

журнал Почвоведение, 2004. № 3. С. 312-321.

УДК 631.4      **ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НА  
ВОДОУДЕРЖИВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ПОЧВ\*\***

**А.В. Смагин, Н.Б. Садовникова, Т.В. Назарова, А.Б. Кирюшова,  
А.В. Машика, А.М. Еремина.**

**ф-т почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова.**

На основе оригинальных методических разработок исследуется влияние природных и синтетических биополимеров на водоудерживающую способность почв разного генезиса и дисперсности. В качестве базового показателя используется основная гидрофизическая характеристика почв (ОГХ). Проведен сравнительный анализ ОГХ различных генетических горизонтов, а также образцов почв до и после внесения (удаления) биополимеров в процессе лабораторных экспериментов и длительных полевых опытов. Выявлена тесная зависимость энергии водоудерживания от концентрации органического углерода в почвах. Показана возможность серьезной деградации гидрофизических свойств и физического состояния почв при их сельскохозяйственном использовании в условиях дефицитного углеродного бюджета.

**Введение.**

Одной из приоритетных задач современного биофизического направления в почвоведении следует считать изучение воздействия организмов и продуктов их жизнедеятельности на физическое состояние почв [11]. Аккумуляция биополимеров как материальных носителей такого воздействия приводит к коренным изменениям физических свойств материнской породы (субстрата) в процессе почвообразования и окультуривания почв, заключающимся в оптимизации их структуры, проницаемости, поглотительной и водоудерживающей способности. [6,7,11,10,14,15,17–20]. Вместе с тем при обратном процессе – деструкции органического вещества (ОВ) почвы происходит неизбежная деградация их физического состояния, фиксируемая по ряду таких показателей, как уплотнение и слитизация, дезагрегация, потеря водопропускности структуры, ухудшение водоудерживания и способности почвы проводить влагу и газообразные вещества [1,6,18,20]. Таким образом, соотношение скоростей аккумуляции и деструкции ОВ или кинетика его трансформации определяют длительную, направленную динамику физического состояния почв, связанную с необратимыми изменениями твердофазных компонентов [10,13]. Прогноз и реконструкция подобной динамики могут осуществляться на базе кинетических моделей трансформации и транслокации ОВ, разработка и анализ которых содержатся в наших недавних публикациях [12,19]. Для этого необходимо связать интенсивный показатель содержания ОВ в почве (концентрацию, запасы) с базовой характеристикой ее физического состояния. В качестве последней удобно использовать ОГХ, которая, будучи дополненной границами предельно равновесных

---

\*\* Финансовая поддержка РФФИ, проект 02-04-48087, «Кинетика биофизических процессов»

(критических) состояний и диапазонов устойчивости почвенной физической системы, является диаграммой ее физического состояния [3,13,18]. Для экспериментального получения ОГХ в широком диапазоне варьирования влажности в наших работах предложено использовать инструментальный метод равновесного центрифугирования [16,18]. Заметим, что значимое влияние ОБ на ОГХ выявляется на большом статистическом материале косвенным образом при анализе баз данных физических свойств и расчете педотрансферных функций [9,21,22]. Однако, работ по непосредственной экспериментальной оценке этого влияния не так уж много [5,8,10,15,17,18], из-за чего сих пор окончательно не ясны механизмы воздействия ОБ на водоудерживающую способность и физическое состояние почв. Резюмируя, можно заключить, что, несмотря на всеобщее признание значимости, проблема влияния ОБ на водоудерживающую способность и физическое состояние почв на количественном уровне остается недостаточно исследованной. И в данной работе содержится попытка такого исследования на единой концептуальной и методической основе, изложенной в предшествующей публикации [13]. В связи с этим поставлены следующие практические задачи:

- 1) С помощью метода равновесного центрифугирования получить ОГХ почв различного генезиса, дисперсности и структурной организации.
- 2) Провести сравнительный анализ ОГХ генетических горизонтов почв.
- 3) Провести сравнительный анализ ОГХ образцов до и после удаления (внесения) ОБ в условиях лабораторного эксперимента.
- 4) Исследовать изменения ОГХ почв в процессе их длительного сельскохозяйственного использования при различных культурах земледелия.
- 5) Выявить связь энергии водоудерживания с содержанием ОБ в почве.
- 6) Выявить влияние ОБ на почвенно-гидрологические константы.

#### **Объекты и методы исследования.**

Для сравнительного анализа ОГХ были выбраны образцы почв различного генезиса и дисперсности, представленные следующими типами:

- 1) Подзолистые и дерново-подзолистые легкого, среднего и тяжелого гранулометрического состава (Московская обл. (УОПЭЦ МГУ «Чашниково», Серебряноборское л-во, о.Лохин, Приокско-террасный зап.), Рязанская обл. (Белоомутское л-во), Коми (р. Мая), Карелия (зап. Кивач), Латвия (Мангальское л-во)).
- 2) Серые и бурые лесные легкого и среднего гранулометрического состава (Московская обл. (Серебряноборское л-во, о.Лохин), Тульская обл. (Тульские засеки), Владимирская обл. (Владимирский НИИСХ)).

3) Черноземы обыкновенные, выщелоченные, оподзоленные, типичные, слитые и лугово-черноземные почвы среднего и тяжелого гранулометрического состава (Липецкая обл., Воронежская обл., Орловская обл., Курская обл., Краснодарский край, Украина (Харьковская обл.)).

4) Каштановые супесчаные и суглинистые (Волгоградская обл.).

5) Дерново-степные, дерново-боровые, дерново-глееватые, аллювиальные, ферралитные песчаные и супесчаные (Волгоградская обл. (Арчединский лесхоз, Обливская ОПХ), Ростовская обл. (ст. Вешенская, Сев. Донец), Оренбургская обл. (Бузулукский бор), Читинская обл. (р.Онон), Якутия (р. Тюньга, о. Миэхебия), Бурятия (Онохойская оп.ст., Кяхта), Украина (Харьковская обл, Песковское л-во; Нижний Днепр, Олешковское л-во), Эстония (о. Хийумаа), Венгрия (Ирсент-Миклош, Нирши), Румыния (Ивешти), Китай (Чанжи).

6) Кварцевые, карбонатные и полиминеральные пески (Прикаспийская низменность (Терскокумские пески, Калмыкия ), Казахстан (Сев. Приаралье, Юж. Прибалхашье), Киргизия (Урдинские пески), Казахстан, Узбекистан, Туркмения (Кызылкумы, Каракумы, ст. Репетек), О.А.Э. (Дубаи).

7) Торфяно-болотные, аллювиально-болотные, торфяно-глеевые почвы, органогенные горизонты (подстилки) (Московская обл. (УОПЭЦ МГУ «Чашниково», Центральная торфоболотная станция, о. Лохин, Приокско-террасный зап.), Рязанская обл. (Белоомутское л-во), Тульская обл. (Тульские засеки), Томская обл. (ст. «Плотниково»), Тверская обл. (Западнодвинский ст. ИЛРАН)).

Кроме того, были исследованы образцы дерново-подзолистых легкосуглинистых почв векового опыта ТСХА, заложенного в 1912 г., в следующих вариантах: – чистый пар, пар, картофель бессменно и рожь бессменно. Каждый вариант предусматривал три вида культивации – без удобрений (контроль), внесение навоза и известкование.

Влияние синтетических ОБ исследовалось на примере сильнонабухающих полимерных гидрогелей (СПГ) – почвенных кондиционеров нового поколения, успешно применяемых для повышения водоудерживающей способности почв легкого гранулометрического состава [15,17]. Поскольку рабочие дозы СПГ не превышают 0,1-0,3% от массы почвы, кондиционер вносился во влажном состоянии, после предварительного свободного набухания в воде, что обеспечивало равномерность его распределения в почве (субстрате).

Для удаления ОБ из почвы использовались два способа – «жесткий», заключающийся в прокаливании при 450-500°C в муфельной печи и «мягкий» – микробиологическая деструкция в условиях длительных (6-12 мес.) лабораторных экспериментов, проводимых при оптимальных влажностях и температурах. Прокаленные образцы сохраняли рыхлое сложение

(не спекались), а также способность к смачиванию (молекулярной адгезии воды) и при насыщении влагой были близки по величине полной водовместимости к исходным (нативным). При этом изменения в окраске образцов и тест на содержание углерода, свидетельствовали о полном удалении ОВ из почв. Прокаливание образцов материнской породы и генетических горизонтов, не содержащих ОВ, практически не отражалось на ОГХ в случае почв легкого гранулометрического состава или приводило к небольшому снижению энергии водоудерживания для тяжелых почв, по видимому, из-за частичной дегидратации коллоидов, разрушения карбонатной и железистой цементации ЭПЧ. Эти изменения ОГХ, однако, лишь в редких случаях превышали 10% от снижения водоудерживания при прокаливании образцов гумифицированных горизонтов тех же почв. Таким образом, можно заключить, что «жесткая» обработка при указанных температурах целиком разрушает органические компоненты и лишь незначительно сказывается на минеральной части твердой фазы, что позволяет применять ее в качестве экспрессной методики сравнительного анализа влияния ОВ на водоудерживающую способность почв. В дополнение исследовались образцы после «мягкого» микробиологического окисления ОВ, а также дегумификации почвы в условиях векового комплексного опыта (ТСХА).

Получение ОГХ базировалось на оригинальных разработках инструментального метода равновесного центрифугирования [16,18]. Присущие методу высокая точность, воспроизводимость результатов, экспрессность, нетрудоемкость, малый размер образцов, делают его оптимальным средством для сравнительного массового анализа ОГХ. В работе использовался вариант микро-метода, реализованный на базе лабораторной центрифуги ЦЛС-3 [18.]. Анализ образцов проводился в двойной–тройной повторности, после чего данные усреднялись.

Содержание органического углерода определялось способом сухого сжигания на экспресс-газоанализаторе АН - 7529. При массовых анализах почв легкого гранулометрического состава использовались регрессионные зависимости между содержанием органического углерода и потерями при прокаливании, полученные на сериях тест-образцов. Для определения органического углерода органогенных пористых сред (подстилок, торфов), навески предварительно смешивались с инертным материалом (кварцевым песком).

Анализ ОГХ осуществлялся по предложенной в предшествующей работе методике [13]. Численным интегрированием ОГХ находился показатель суммарной энергии водоудерживания (Е, Дж/кг тв.фазы). Границы предельно равновесных (критических) состояний и соответствующие им почвенно-гидрологические константы определялись по ОГХ следующими способами. Наименьшая влагоемкость (НВ) – по пересечению кривой ОГХ и ординаты

потенциала влаги, соответствующего максимальной высоте капиллярного поднятия ( $\Psi_k$ ), определяемой экспериментально, или по формуле [13]:

$$\Psi_k = \frac{\sigma_{ж/г} S_{ск} \rho_b}{(1 - \rho_b / \rho_s - \rho_b Wa / \rho_l)}, \text{ где} \quad (1)$$

$\sigma_{ж/г}$  – поверхностное натяжение воды (почвенного раствора),  $\rho_l$ ,  $\rho_b$ ,  $\rho_s$  – плотности воды, почвы и ее твердой фазы,  $Wa$  – содержание прочносвязанной влаги (при отсутствии данных принято равным гигроскопии образца),  $S_{ск}$  – эффективная удельная поверхность структурных элементов ЭПЧ, рассчитываемая по данным гранулометрического анализа частиц:  $S_{ск} = \int (3F/\rho_s r) dr$ , где  $F = dCUM/dr$ , CUM- кумулята гранулометрического состава в пределах от  $r = 0,5 \mu\text{м}$  до  $0,5 \text{мм}$ .

При неглубоком уровне залегания грунтовых вод ( $z$ ), вместо наименьшей, оценивалась так называемая динамическая влагоемкость по пересечению ОГХ и линии гравитационного потенциала ( $\Psi_g$ ) [13]:

$$\Psi_g = \rho_b W \cdot z \cdot g / \rho_l, \text{ где } g \text{ – ускорение силы тяжести.} \quad (2)$$

Еще одна константа - влажность разрыва капиллярной влаги (ВРК) или аналогичная ей величина максимальной молекулярной влагоемкости определялась по кривой эффективной удельной поверхности жидкой фазы ( $S_w$ ) из условия  $S_w = S_{ск}$  [13]. Функция  $S_w$  находится численным интегрированием ОГХ по формуле:

$$S_w = \{ \int \Psi_m dW \} / \sigma_{ж/г}, \text{ где } \Psi_m \text{ матричный потенциал почвенной влаги.} \quad (3)$$

Численное интегрирование при оценке показателей  $E$ ,  $S_{ск}$ ,  $S_w$ , производилось помощью специальной программы, выполненной в виде макроса EXCEL (автор - М.В.Глаголев). На рис.1 приведены примеры определения вышеуказанных констант по ОГХ подзолистой почвы (Коми). Сопоставление расчетных констант с данными полевых экспериментов (НВ\*) и альтернативных методик (ВРК\* = ММВ по Лебедеву) подтвердило возможность и достоверность их оценки по ОГХ предлагаемыми способами (табл.1). Традиционные свойства и показатели (гранулометрический состав,  $\rho_b$ ,  $\rho_s$ , МГ, НВ\*, ВРК\*...) анализировались общепринятыми методами физики почв [2].

### Результаты и обсуждение.

Обратимся к результатам исследования. На рис.2 представлены серии кривых ОГХ почв легкого гранулометрического состава и органогенных пористых сред различных типов и природных зон. Сравнивая ОГХ органогенных, гумусово-аккумулятивных горизонтов и нижележащих слоев, включая материнскую породу, можно заключить, что водоудерживающая способность горизонтов L и A существенно выше. То же следует из сопоставления

показателей интегральной энергии водоудерживания и почвенно-гидрологических констант (табл.1) Эти факты являются следствием биогенной организации экосистем на грубодисперсных субстратах с низким уровнем плодородия и неблагоприятным водным режимом [10,14]. Аккумуляция ОВ в ходе экогенетических сукцессий направлена на сосредоточение в верхней корнеобитаемой толще биогенных элементов (явление органогенного парагенезиса по Вернадскому), а также на повышение поглотительной и водоудерживающей способностей формирующихся почв. Последнее крайне необходимо, поскольку грубодисперсные субстраты имеют высокую водопроницаемость, и влага атмосферных осадков быстро уходит из корнеобитаемого слоя вглубь почвы, а верхние горизонты сильно иссушаются. В таких условиях растения испытывают постоянный дефицит влаги, что является главным экологическим фактором, лимитирующим их рост и развитие. В связи с этим на начальных этапах самоорганизации БГЦ на песках лесной зоны формируются мощные запасы ОВ в виде детрита (подстилки), обладающего высокой водоудерживающей способностью [10,14]. Резкая граница между подстилкой и поверхностью минеральной части почвы также способствует перехвату и консервации атмосферной влаги по принципу слоистой конструкции с нарушением капиллярной связности. Поэтому часто, даже после сильных ливней минеральные горизонты песчаных лесных почв остаются сухими, а влага концентрируется в подстилке. Однако, подобные примитивные почвы, в которых все плодородие сосредоточено в органогенном горизонте, крайне неустойчивы к внешним факторам воздействия, в частности – пожарам. Помимо того они обладают низкой интенсивностью биологического круговорота, что диктуется необходимостью аккумуляции детрита, и поэтому являются малопродуктивными. Постепенное формирование минеральных гумусово-аккумулятивных горизонтов и увеличение их мощности, позволяет поселиться более требовательным к водному режиму и плодородию почв организмам, что в свою очередь вызывает интенсификацию круговорота веществ и энергии [10,14]. Наряду с влагоаккумулирующими верхними горизонтами, определенную роль в удерживании влаги начинают играть слои иллювиального генезиса, с пониженной водопроницаемостью (псевдофибры, гор.  $B_{h,fe}$ ). Конечным результатом биогенной организации являются хорошо дифференцированные почвы с супесчаными гумусово-аккумулятивными горизонтами, обладающими с одной стороны высокой водоудерживающей способностью (рис.2, табл.1), а с другой – устойчивостью ОВ в виде гумуса почвы. Такие почвы в лесной зоне обеспечивают рост и развитие высокобонитетных лесов, преимущественно смешанного типа, а в степной – формирование устойчивых травяных ценозов с высокой продуктивностью и биоразнообразием [4,10,14]. В целом, для почв легкого гранулометрического состава характерна четкая

вертикальная анизотропия энергии водоудерживания с максимальными значениями показателя  $E$  в верхних органогенных и гумусово-аккумулятивных горизонтах и минимальными – в грубодисперсной материнской породе. Исключение составляют почвы с погребенными горизонтами А, или подстилаемые более тяжелыми по гранулометрическому составу отложениями.

Таблица 1. Интегральная энергия водоудерживания и ПГК почв и пористых сред.

Почвы (пористые среды)	$E$ , Дж/кг	$W_s$ , %	ВРК, %	НВ, %	ВРК*	НВ*, %
Мономинеральные несвязные пески, прокаленные образцы песчаных и супесчаных почв	7-12	22-28	1-2	2-4	1-3	1-3
Полиминеральные несвязные пески сухих степей, полупустынь, пустынь	10-20	20-30	2-4	4-6	4-5	5-6
Связнопесчаные почвы лесной и степной зон (АЕ, В, Е)	15-25	25-35	3-5	5-7	4-5	6-8
Связнопесчаные и супесчаные почвы лесной и степной зон (А)	25-60	30-40	4-6	6-15	5-7	8-16
Легкосуглинистые дерново-подзолистые (А,Е,В)	90-120	35-45	13-17	18-26	12-16	17-25
Среднесуглинистые серые, бурые лесные (А).	110-140	40-50	14-18	20-25	15-18	18-27
<i>Среднесуглинистые серые лесные, после дегумификации</i>	60-70	30-50	3-5	9-15	-	-
Черноземы среднего и тяжелого состава (А)	140-200	60-90	20-30	30-45	18-26	29-48
<i>Черноземы, (А), после дегумификации</i>	60-90	50-90	5-10	15-20	-	-
Подстилки лесных и болотных почв	250-500	200-400	40-60	70-100	-	190-300
Торфа верхового, низинного и переходного типов	1300-1900	1000-1900	150-300	400-600	100-200	360-600

$W_s$  – предельное насыщение образца при свободном набухании.

Удаление ОВ гумусовых горизонтов равнозначно превращению грубодисперсных почв по физическим свойствам в исходную материнскую породу (рис.2, табл.1). Так ОГХ дегумифицированных образцов практически повторяют таковые для горизонтов С. Уменьшение водоудерживания происходит достаточно равномерно во всем диапазоне

исследуемых величин матричного потенциала и равновесной влажности. До уровня, присущего материнской породе, снижаются полная влагоемкость и другие почвенно-гидрологические константы. Ранее было показано, что аналогичные изменения претерпевают дисперсность (удельная поверхность), гигроскопичность и агрегатная структура легких почв [10]. Воздействие ОВ на физическую организацию субстрата в этом случае сводится, по видимому, к двум механизмам. Во-первых ОВ, будучи преимущественно коллоидным высокодисперсным материалом, само по себе обладает чрезвычайно высокой водоудерживающей способностью, поэтому даже простое физическое смешивание минерального субстрата с органическим приведет к достаточно равномерному увеличению влагоемкости и энергии водоудерживания. Такой механизм отчетливо выявляется при анализе ОГХ песчаных субстратов и их смесей с СПГ, подчиняющихся правилу аддитивности потенциалов влаги [15]. Во-вторых, ОВ выступает в качестве структурообразующего агента, способствуя склеиванию грубодисперсных минеральных ЭПЧ в рыхлые агрегаты (органогенная цементация), что также неминуемо отражается на водоудерживающей способности и физическом состоянии легких почв, в особенности супесчаных. В кислых примитивных, подзолистых и дерново-подзолистых песчаных почвах под хвойной растительностью условия для органогенной цементации фактически отсутствуют. С одной стороны – по причине небольших количеств ОВ, преимущественно в форме детрита и грубого гумуса, с другой – из-за ненасыщенности почвенно-поглощающего комплекса основаниями – коагуляторами ОВ. Поэтому в таких почвах доминирующим механизмом повышения водоудерживающей способности является объемное поглощение (абсорбция) влаги набухающим ОВ, в основном – частицами детрита.

В целом можно заключить, что грубодисперсные почвы своим физическим плодородием фактически целиком обязаны аккумуляции ОВ. Учитывая крайне высокие темпы минерализации ОВ хорошо аэрируемых почв легкого гранулометрического состава [19] и относительно невысокий средний уровень содержания гумуса, следует отметить, что их сельскохозяйственное использование должно сопровождаться обязательной организацией бездефицитного углеродного бюджета. В противном случае неминуемо наступает полная деградация этих почв в короткие (десятки лет) сроки.

То же касается органогенных образований – гидроморфных почв с мощными торфяными горизонтами и лесных подстилок. Причем в еще большей степени, поскольку минерализация ОВ в этом случае приводит к полному исчезновению органогенной почвы как физического тела с присущими ему свойствами, включая водоудерживание. По величинам влагоемкости и энергии водоудерживания подстилки и торфа занимают лидирующее положение, существенно опережая минеральные почвы (Табл.1). При этом они достаточно изотропны по

характеристике водоудерживания, которое остается неизменно высоким на протяжении всей торфяной толщи (рис.2). Естественное варьирование ОГХ по глубинам, а также отличия между разными типами торфов и подстилок связаны с неодинаковым составом растительных остатков, степенью их разложения, и уплотнением (уменьшением полной влагоемкости).

Максимальные значения показателей водоудерживания характерны для торфов, где полная влагоемкость может быть равной 1500-2000%, а величина  $E$  – 1000- 2000 Дж/кг. Для сравнения - даже в черноземах  $E$  редко достигает 200 Дж/кг. При этом органогенные пористые среды совмещают в себе качества, характерные с одной стороны для грубодисперсных макропористых систем (большой диапазон доступной влаги (60-80% от  $W_s$ ), хорошие впитываемость осадков, проницаемость для воды и воздуха), а с другой – для тяжелых почв с высокой поверхностной энергией (значительные величины влагоемкости, гигроскопичности, сорбционной и поглотительной способности). Такие свойства позволяют гидроморфным почвам и экосистемам играть важнейшую роль в круговороте воды, минеральных веществ и газов в качестве биофильтров и депонирующих резервуаров. Они же делают торфа незаменимым компонентом искусственных почвенных конструкций, направленных на концентрирование и аккумуляцию влаги и питательных элементов в корнеобитаемой зоне при выращивании растительных культур в городских условиях [17]. Однако, повторяем, органогенные почвы являются наиболее уязвимыми к внешним воздействиям и необратимо исчезают при мгновенной (пожары) или растянутой во времени (микробиологическое разложение) деструкции ОВ. Поэтому их эксплуатация, должна быть по возможности минимизирована, с учетом важнейшего экологического значения этих объектов природы, и проводиться на основе двусторонней регуляции водного режима (польдерные системы). Использование торфа в городских условиях при проведении озеленительных работ также должно осуществляться на базе научно-обоснованных технологий. Так можно рекомендовать слоистые конструкции типа «сэндвич» [17] с обязательной изоляцией торфяного влагоаккумулирующего слоя от поверхности, где потери ОВ (деструкция, смыв, возгорание..) идут максимальными темпами (60-100% торфа в год). При расчете оросительных норм такой конструкции необходимо учитывать, что экстремум скорости разложения торфа приходится на область близкую к состоянию насыщения влагой (0,85-0,95  $W_s$ ) [19]. Поэтому важно не переувлажнять торфяной горизонт и поддерживать в нем содержание воды на уровне, близком к наименьшей влагоемкости, оценка которой по ОГХ дает величины 400-600% (табл.1).

Проблема быстрой деструкции ОВ в сопровождении с деградацией физических свойств касается и синтетических компонентов современных почвенных конструкций, в частности – СПГ. Десятилетний опыт исследований этих веществ показывает, что они являются

эффективным средством повышения водоудерживающей способности грубодисперсных почв и могут с успехом применяться при проведении озеленительных работ в условиях дефицита влаги [15,17]. В ходе исследований были выявлены оптимальные дозы и способы внесения СПГ в почву, показаны явные преимущества этого класса мелиорантов перед другими почвенными кондиционерами. Однако, как и в случае торфа, СПГ, являясь органическим материалом, подвержен биодеструкции, и поэтому эффект от его внесения в почву постепенно сходит на нет. Так, внесение СПГ в кварцевый несвязный песок (удельная поверхность по БЭТ =2-3 м<sup>2</sup>/г, физическая глина менее 1%, E= 7-10 Дж/кг, W<sub>s</sub> =23-26%, НВ=ВРК= 1-1,5%) в дозе всего 0,2% от массы образца повысило его водоудерживающую способность до уровня супесчаных и легкосуглинистых серых лесных почв пойменных дубрав или дерново-степных почв высокопродуктивных травяных ценозов (S<sub>БЭТ</sub> =30-40 м<sup>2</sup>/г, ФГ=15-30%, E =40-60 Дж/кг, W<sub>s</sub> =38-50%, НВ =12-16%, ВРК =7-8 %). Последующие эксперименты по лабораторной инкубации образцов показали, что при оптимальной для биодеструкции СПГ температуре (30°С) уже через 6 месяцев водоудерживающая способность модельных сред уменьшилась практически в два раза (Рис.2). При обычной (комнатной) температуре процесс замедлялся, но ощутимое снижение водоудерживания также имело место. Эти факты необходимо учитывать при проектировании почвенных конструкций на основе органических материалов и режимов их эксплуатации, включая периодическое внесение добавочных доз кондиционеров.

Рассмотрим влияние ОВ на ОГХ тонкодисперсных минеральных почв (рис.3). Как правило, тяжелый состав материнской породы определяет в них изначально высокий уровень водоудерживающей способности на протяжении всей почвенной толщи. Биогенная организация в этом случае направлена на улучшение проницаемости пористой среды при сохранении хорошей водоудерживающей и поглощательной способности, что достигается посредством образования агрегатной структуры. В отличие от почв легкого гранулометрического состава, где увеличение водоудерживания связано в первую очередь с «объемным» механизмом – набуханием самого ОВ в макропористом вмещающем материале, в тяжелых почвах на первый план, по-видимому, выступают «поверхностные» характеристики биополимеров как сильнодействующих поверхностно - активных веществ. Поэтому, даже относительно небольшие количества ОВ, модифицируя исходную поверхность тонкодисперсных ЭПЧ, приводят к существенным изменениям в структурном состоянии и водоудерживающей способности подобных почв. Теоретическое обоснование такого механизма воздействия ОВ, связанного с формированием так называемого структурного ПАВ-барьера (по Ребиндеру), дано в нашей предшествующей работе [13]. Там же приведены критерии устойчивости ПАВ барьера, предохраняющего минеральные частицы от слипания, и

способствующего связыванию почвенной влаги за счет поверхностных сил молекулярной адгезии. Из критериев следует, что критические влажности (границы барьера) и соответствующие им почвенно-гидрологические константы, пропорциональны содержанию адсорбированного на ЭПЧ органического вещества [13]. Поэтому удаление последнего будет закономерно способствовать снижению значений почвенно-гидрологических констант (влагоемкостей) и энергии водоудерживания, что хорошо подтверждается экспериментальными данными (Рис.3, Табл 1). Как и следует из теории [13], наибольшие и статистически достоверные отличия ОГХ нативных и дегумифицированных образцов возникают в области средних значений влажности, где поверхностные (молекулярные) силы начинают доминировать над объемными (капиллярными). Близкие результаты получены для обыкновенных черноземов Каменной степи с использованием микроспихрометрического метода оценки ОГХ [5]. По мере увеличения влажности и приближения к состоянию насыщения, отличия ОГХ стираются, а в случаях малогумусных почв – кривые вообще могут пересекаться, то есть дегумифицированные образцы становятся более влагоемкими. Это связано, по-видимому, с достаточно «жесткой» структурой подобных почв, которые из-за относительно небольших (до 2-3%  $C_{орг}$ ) количеств ОВ набухают не сильно, в пределах полной водовместимости, обусловленной в основном сложением минеральных компонентов. Удаление ОВ способствует здесь появлению дополнительной пористости, которая занимается влагой. Лишь в сильногумусированных почвах, преимущественно черноземного ряда, набухание из-за присутствия большого количества органических и органоминеральных коллоидов, способных к молекулярной адгезии воды, становится фактически неограниченным. Из-за чего величина  $W_s$  не является постоянной, а зависит от степени набухания образцов. При удалении ОВ резко снижается способность к набуханию и, соответственно, падает значение  $W_s$ . В связи с этим ОГХ нативных и дегумифицированных образцов достоверно различаются не только в средней части, но и в области, близкой к насыщению.

Потери ОВ вследствие сельскохозяйственного использования почв неминуемо отражаются на их физическом состоянии и водоудерживающей способности, в частности. На рис.3 приведены ОГХ образцов дерново-подзолистых легкосуглинистых почв векового опыта ТСХА, откуда видно, что даже при внесении органических удобрений в обрабатываемых почвах не удается сохранить уровень водоудерживания, присущий целине. Наибольший вред наносят виды обработки без внесения навоза и бессменное выращивание картофеля. Рожь в меньшей степени ухудшает почву, по-видимому, из-за наличия дополнительного источника органического углерода в виде корневых систем. В целом, вековой опыт фиксирует статистически значимые негативные изменения физического состояния дерново-подзолистых

почв при их распашке. Аналогичные результаты для чернозема обыкновенного получены в цитируемой ранее работе [5].

Обобщение результатов исследования по влиянию ОВ на водоудерживающую способность почв представлено на рис.4. Верхняя диаграмма иллюстрирует на примере нескольких типов и классов почв вклад ОВ в суммарную энергию водоудерживания (показатель E). Характерно, что в большинстве случаев он достигает 50% и более, хотя общее содержание ОВ составляет лишь несколько (1-6%) процентов от массы минеральных почв. Максимальный вклад (60-98%) свойственен естественно органогенным пористым средам ( $\Delta E$  - относительно подстилающих минеральных горизонтов) и сильногумусированным почвам черноземного ряда. Связь между энергией водоудерживания и содержанием органического углерода представлена на второй части рисунка. В целом на всем массиве исследованных образцов от песков до органогенных материалов удалось получить достаточно тесную линейную корреляцию:  $E \text{ (Дж/кг)} = 19C_{\text{орг}}\%$ ,  $R^2=0,95$ . В рамках отдельных классов дисперсности или гумусности, варьирование данных остается высоким, что указывает на сложный характер зависимости  $E(C_{\text{орг}})$  и необходимость учета не только содержания ОВ, но и его качества.

#### **Выводы:**

1. На большом статистическом материале с использованием единой концептуальной базы и оригинальных методических разработок исследовано влияние ОВ на ОГХ почв.
2. Для всех изученных почв отмечается чрезвычайно высокое значение ОВ в формировании водоудерживающей способности, что отражает биогенную организацию физического субстрата в ходе почвообразования. Вклад ОВ в интегральную работу по удержанию влаги в минеральных горизонтах составляет в среднем 50%, и на 1г органического углерода в почвах приходится около 2 Дж суммарной энергии водоудерживания.
3. Удаление ОВ из почвы приводит к существенной деградации ее физического состояния, фиксируемой по статистически достоверному уменьшению величин энергии водоудерживания и почвенно-гидрологических констант (влагоемкостей). При этом сходные результаты получены как при быстром окислении (сжигании) ОВ лабораторных условиях, так и при естественной биодеструкции ОВ в ходе длительных полевых опытов.
4. Механизмы воздействия ОВ на ОГХ зависят от исходной дисперсности субстрата. В грубодисперсных макропористых средах доминирует непосредственное объемное поглощение (абсорбция) влаги при набухании ОВ, в тонкодисперсных – косвенное влияние, преимущественно через поверхностное взаимодействие ОВ и ЭПЧ, заключающееся в образовании агрегатной структуры и модификации поверхности ЭПЧ (формировании ПАВ-барьера).

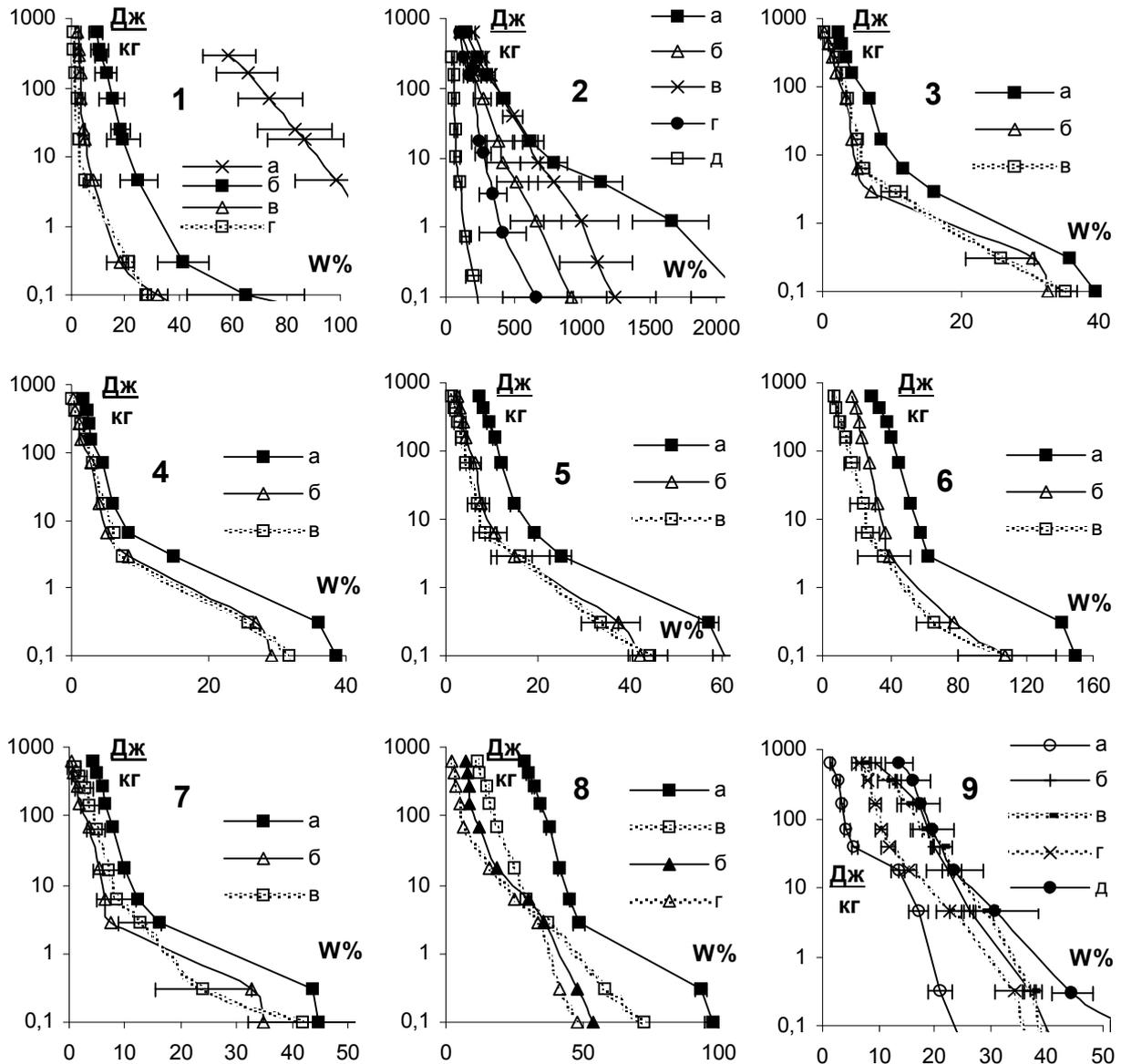
### **Благодарности:**

Авторы сердечно благодарят сотрудников кафедры физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ Смирнову Л.Ф. и Хайдапову Д.Д. за предоставленные образцы почв и сопутствующую информацию по ним.

### **Список литературы:**

1. Бондарев А.Г. Теоретические основы и практика оптимизации физических условий и плодородия почв // Почвоведение, 1994, №11. С.35-42.
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М. Агропромиздат, 1986. 416 с.
3. Воронин А.Д. Энергетическая концепция физического состояния почв. // Почвоведение, 1990, №5. С. 7-19 .
4. Гаель А.Г., Смирнова Л.Ф. Пески и песчаные почвы. М. ГЕОС. 1999. 252 с.
5. Глобус А.М., Туленинова О.К. Влияние длительности и характера землепользования на свойства обыкновенного чернозема // Почвоведение, 2000, №2. С. 220-223 .
6. Кузнецова И.В. Роль органического вещества в образовании водопрочной структуры дерново-подзолистых почв. // Почвоведение, 1994, №11 С.31 -41 .
7. Кузнецова И.В., Бондарев А.Г., Данилова В.И. Устойчивость структурного состояния и сложения почв при уплотнении // Почвоведение, 2000, №9. С. 1106-1113 .
8. Мироненко Е.В., Салимгареева О.А., Понизовский А.А., Чудинова С.М. Влияние гидрофобных жидкостей на водоудерживание и энергетическое состояние воды в почвах // Почвоведение, 2000, №4. С. 463-470.
9. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв. М.МГУ. 2001. 200с.
10. Смагин А.В. Агрегатный уровень организации песчаных почв. // Почвоведение, 1993, №6. С. 16-23.
11. Смагин А.В. Биогеоценологическое направление в почвоведении // Почвоведение, 1996, №3. С. 298-309 .
12. Смагин А.В. Распределенные кинетические модели органопрофиля почв // Вестн. МГУ, сер.17, Почвоведение, 2001, №3. С. 3-7.

13. Смагин А.В. Теория и методы оценки физического состояния почв // Почвоведение, 2002, (в печати)
14. Смагин А.В., Савельев А.А., Смагина М.В. Организация песчаных почв сосновых БГЦ // Почвоведение, 1992, №9. С.120-130.
15. Смагин А.В., Садовникова Н.Б. Влияние сильнонабухающих полимерных гидрогелей на водоудерживающую способность легких почв. // Почвоведение, 1994, №11. С. 50-55.
16. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Мизури Маауиа Бен-Али. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение, 1998, №11. С.1362-1370.
17. Смагин А.В., Губер А.К., Шеин Е.В., Мунир Гайз. Разработка почвенных конструкций и режимов орошения озеленяемых городских ландшафтов в условиях аридного климата // Деградация почв и опустынивание. М.МГУ, 1999. С. 470-482.
18. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Хайдапова Д.Д., Шевченко Е.М. Экологическая оценка биофизического состояния почв. М.МГУ. 1999. 48с.
19. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В., Глаголев М.В. и др. Моделирование динамики органического вещества почв. М.МГУ. 2001. 120с.
20. Хан. Д.В. Органо-минеральные соединения и структура почвы. М. Наука. 1969. 142 с.
21. Gupta S.C., Larson W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic mater content, and bulk density.// Water Resour. Res., 1979, v.15, P. 1633-1635.
22. Shirazi M.A., Boersma L., Hart J.W. A unifying quantitative analysis of soil texture // Soil Sci. of Am., 1998, V.52. P.181-190.



**Рис. 2. ОГХ грубодисперсных почв и органогенных пористых сред**

1. Дерново-подзолистые почвы долинных сосновых БГЦ (Московская, Рязанская обл.) горизонты: а – L, б – А(сложные боры), в – АЕ, Е, В, в – С и  $t^0$ .

2. Органогенные среды: верховое Бакчарское болото, Томская обл. (а– 30см, б–100см), верховое болото, Тверская обл. (в – (0-500см)), г – низинные торфа и лиственные подстилки (Тверская, Московская, Рязанская, Тульская обл.), д – подстилки хвойного и смешанного типа (Московская, Тульская обл.).

3. Каштановая почва (Волгоградская обл.) а – А, б – С, в –  $t^0$ .

4,5. Дерново-степные почвы (Волгоградская обл.) а– А, б – С, в –  $t^0$ .

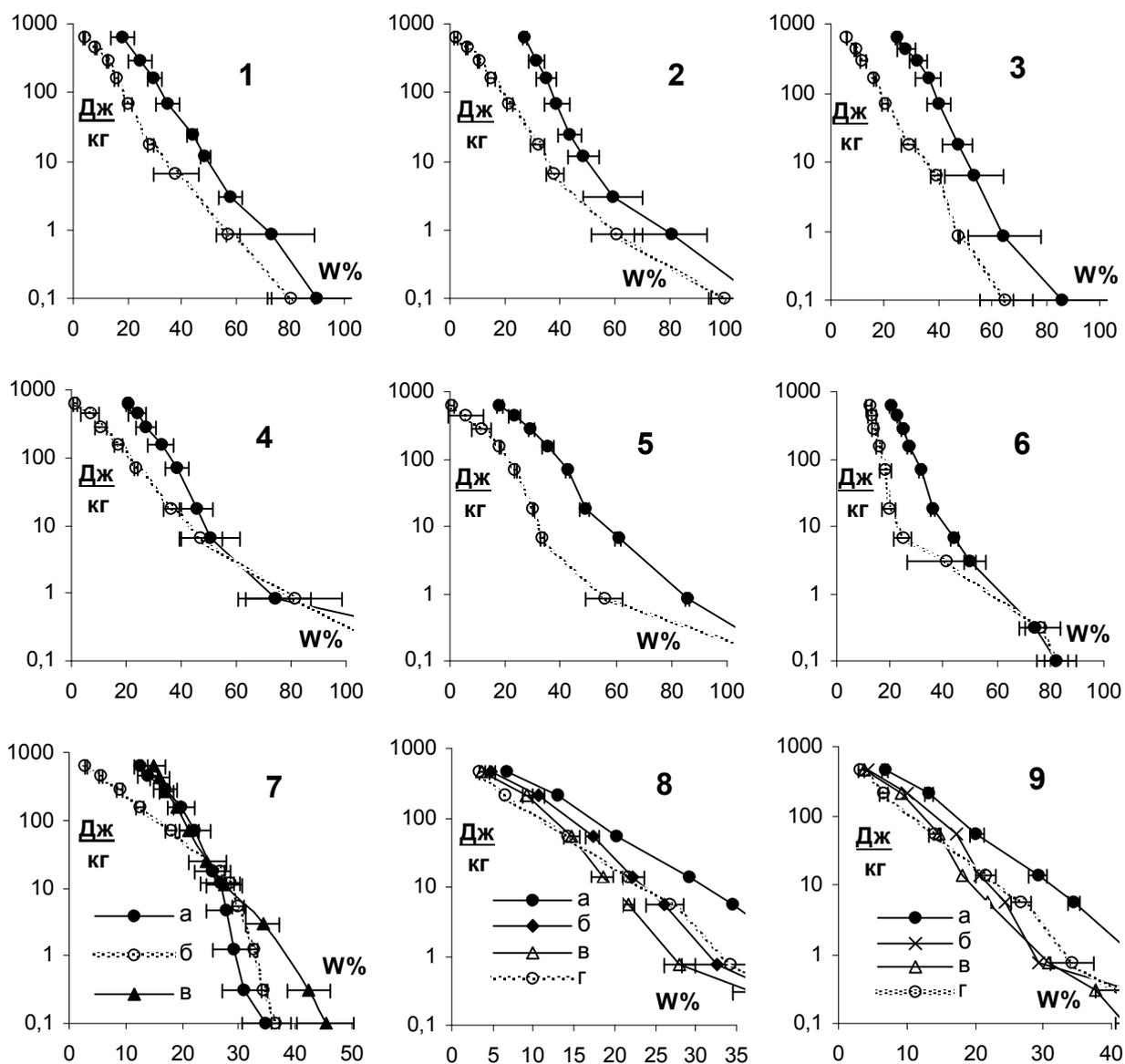
6. Лугово-болотная почва (Харьковская обл.) а – А, б – АВ, в –  $t^0$ .

7. Дерново- глееватая почва (Харьковская обл) а – А, б – Сg, в –  $t^0$ .

8. Ферралитная почва на базальте (Китай) а– А, б– $t^0$ , аллювиальная (Якутия) в–А, г–  $t^0$ .

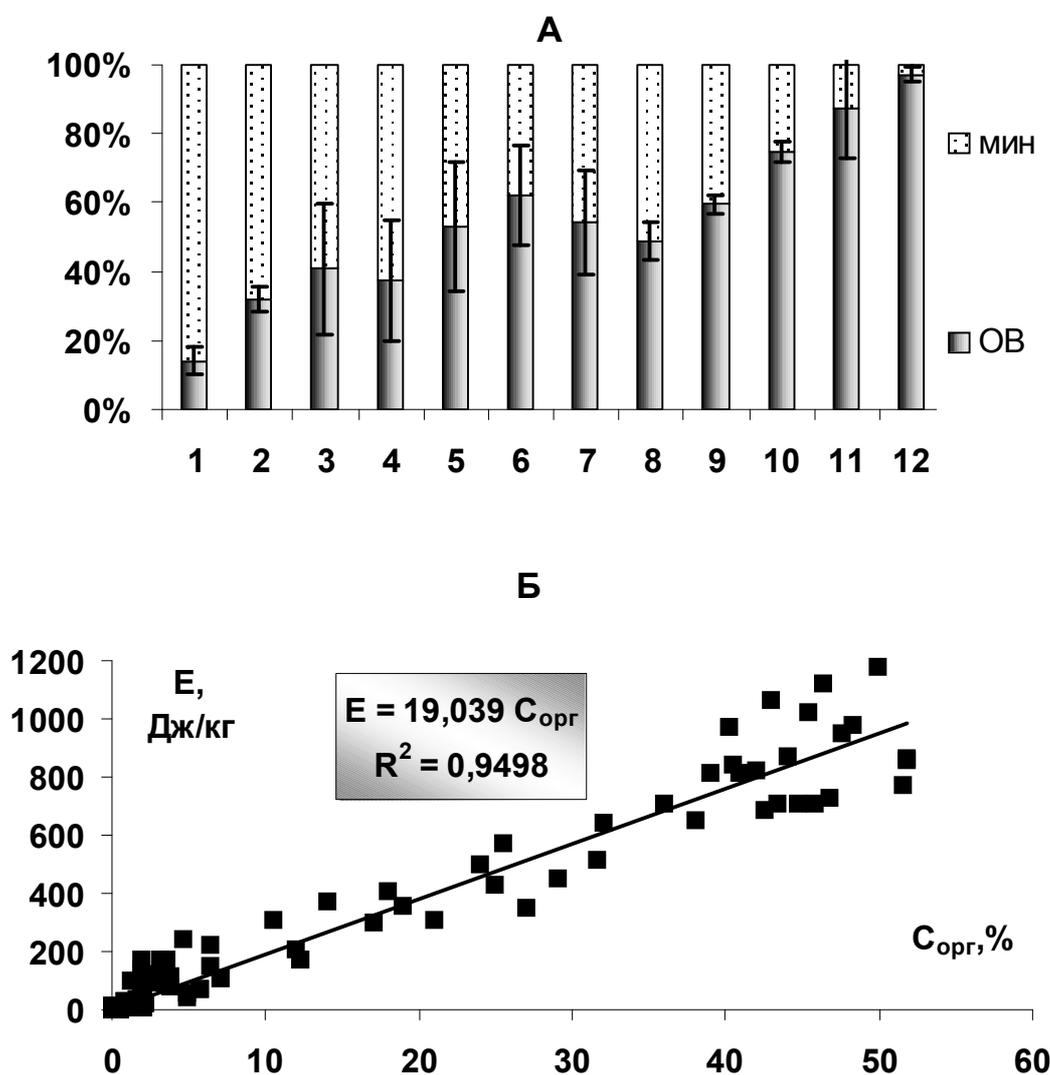
9. СПГ а – субстрат (кварцевый песок), б – 0,2% СПГ, в – инкубация 6 мес. при 20°C, г – инкубация 6 мес. при 30°C, д – супесчаные и легкосуглинистые дерново-подзолистые и дерново-степные почвы, гор. А.

А,Е,В,С... – генетические горизонты,  $t^0$  – прокаленные образцы.



**Рис. 3. ОГХ почв среднего и тяжелого гранулометрического состава**

1. Черноземы типичные (Липецкая обл.); А,  $t^{\circ}$ .
2. Черноземы выщелоченные (Липецкая обл.); А,  $t^{\circ}$ .
3. Черноземы слитые (Краснодарский край, Белореченск); А,  $t^{\circ}$ .
4. Черноземы обыкновенные (Харьковская обл.); А,  $t^{\circ}$ .
5. Черноземы типичные (Воронежская обл.); А,  $t^{\circ}$ .
6. Черноземы типичные (Краснодарский край, Динской р-н); А,  $t^{\circ}$ .
7. Серые лесные почвы (Владимирская обл.); а – А, б –  $t^{\circ}$ . Дерново-подзолистые почвы (Московская обл.); в – А, АЕ, В.
- 8,9. Дерново-подзолистые почвы, А (опыт ТСХА). а – целина, г –  $t^{\circ}$ . 8-б – с удобрениями, 8-в – без удобрений, 9-б – рожь бессменно, 9-в – картофель бессменно. А, АЕ, В... – генетические горизонты,  $t^{\circ}$  – прокаленные образцы.

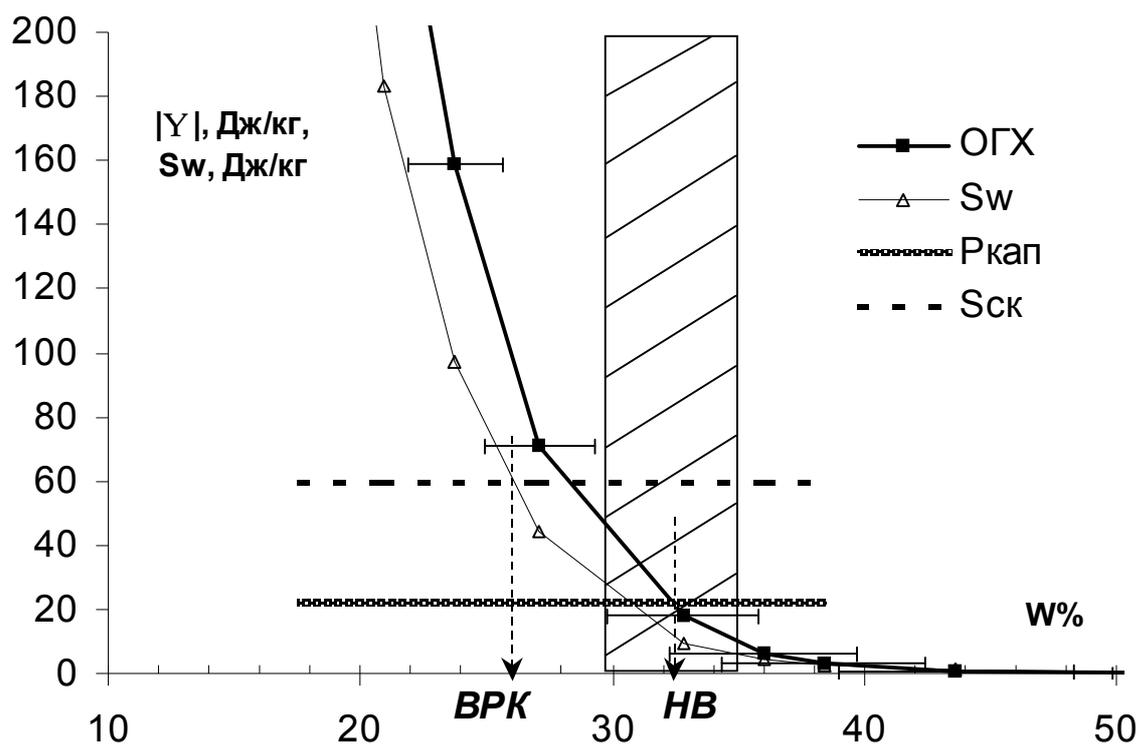


**Рис.4. Влияние органического вещества на интегральную энергию водоудерживания в почвах**

А. Вклад органических и минеральных компонентов в энергию водоудерживания.

1,2 – Дерново-подзолистые суглинистые пахотные (Московская обл.), 3 – Дерново-подзолистые, дерново-боровые, дерново-глеевые песчаные простых сосняков (Московская, Рязанская, Харьковская., Оренбургская обл., Карелия, Латвия), 4 – Аллювиальные песчаные (Якутия, Венгрия, Румыния. Эстония), 5 – Дерново-степные, каштановые песчаные, супесчаные (Волгоградская., Харьковская., Читинская., Бурятская обл., Венгрия), 6 – Дерново-подзолистые песчаные и супесчаные сложных боров и пойменных дубрав (Московская., Рязанская., Тульская обл.), 7 – Серые лесные суглинистые (Тульская, Владимирская обл.), 8 – Черноземы типичные и обыкновенные малогумусные суглинистые и глинистые (Краснодарский край, Харьковская обл.), 9 – Черноземы типичные, обыкновенные и слитые суглинистые (Липецкая, Воронежская, Орловская., Курская обл, Краснодарский край), 10 – Черноземы выщелоченные суглинистые под лесом (Липецкая обл.), 11 – Подстилки дерново-подзолистых, серых лесных, торфяно-болотных почв (Московская, Тульская, Рязанская обл.). 12 – Верховые торфа (Тверская, Томская обл.).

Б. Обобщенная зависимость энергии водоудерживания от содержания органического углерода.



**Рис.1. К методике определения почвенно-гидрологических констант по ОГХ**  
 Пунктирные стрелки – искомые значения ВРК и НВ, заштрихованная область – диапазон оценок НВ\* в полевых условиях методом заливаемых площадей. Остальные пояснения – в тексте.