

УДК 631.432

КОНТАКТНЫЕ УГЛЫ СМАЧИВАНИЯ И ВОДОУСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ*

© 2015 г. В. А. Холодов^{1,2}, Н. В. Ярославцева¹, М. А. Яшин¹, А. С. Фрид¹, В. И. Лазарев³,
З. Н. Тюгай², Е. Ю. Милановский²

¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7
e-mail: vkholod@mail.ru

² Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы

³ Курский научно-исследовательский институт агропромышленного производства,
305526, Курская обл., Курский р-н, пос. Черемушки

Поступила в редакцию 21.05.2014 г.

Из дерново-подзолистых почв и типичных черноземов разного гранулометрического состава и видов использования выделили сухие агрегаты 3–1 мм, которые просеяли в воде. В итоге получили водоустойчивые агрегаты и неводоустойчивые частицы, составляющие сухие агрегаты 3–1 мм. Полученные препараты перетерли, в них методом статической посаженной капли изучили контактные углы смачивания. Полученные значения изменялись от 11° до 85°. В большинстве случаев значения для препаратов водоустойчивых агрегатов значимо превышали контактные углы неводоустойчивых составляющих. Для содержания углерода в структурных отдельностях прямой корреляции между этими показателями не обнаружено. При раздельном анализе почвенных разновидностей только для тяжелосуглинистого типичного чернозема выявлена значимая положительная корреляция между содержанием органического углерода и величиной контактного угла структурных отдельностей. На основе многофакторного дисперсионного анализа показано, что величину угла смачивания определяет принадлежность структурных отдельностей к водоустойчивым или неводоустойчивым составляющим макроагрегата, а также вид использования почвы. Кроме того, в сочетании с этими показателями, опосредованное влияние оказывает гранулометрический состав.

Ключевые слова: агрегаты, угол смачивания, краевой угол, контактный угол, черноземы (Chernozems), подзолистые почвы (Retisols).

DOI: 10.7868/S0032180X15060064

ВВЕДЕНИЕ

Структура почвы – это форма и размер структурных отдельностей в виде макроагрегатов (педов), на которые распадается почва. Структура почвы характеризуется формой и степенью оформленности структурных отдельностей [15]. Для верхних гумусовых горизонтов структура во многом определяет такие важнейшие свойства, как устойчивость почвы к действию неблагоприятных факторов окружающей среды и потенциальное плодородие. Помимо этого, органическое вещество внутри структурных отдельностей (внутриагрегатное вещество) физически защищено от разложения, что значимо снижает скорость его минерализации [12, 15, 25]. Таким образом, структура почв весомо влияет на глобальный цикл углерода [34], плодородие, состояние окружающей среды, процессы накопления и разложения орга-

нического вещества в пахотных почвах [2, 5, 12, 15, 25, 29, 37].

Одним из важнейших показателей структуры является ее водоустойчивость – способность не разрушаться под действием воды [15]. Помимо термина “водоустойчивость” в литературе используют устаревшее понятие “водопрочность” [16].

Согласно современным представлениям, важнейшая роль в формировании и трансформации агрегатов отводится легкоразлагаемому органическому веществу [22, 31, 38, 39, 41]. При этом существуют данные, что в растительных экосистемах легкоразлагаемое органическое вещество (лабильные гумусовые вещества, лабильное органическое вещество) играет заметную роль в формировании водопрочной структуры, его содержится больше в крупных агрегатах и меньше в частицах <0.25 мм. Однако исследования полевых опытов с бессменными парами демонстрируют наличие водоустойчивости у агрегатов, существующих в системах,

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 13-04-01753, 14-04-01893, 14-04-01683.

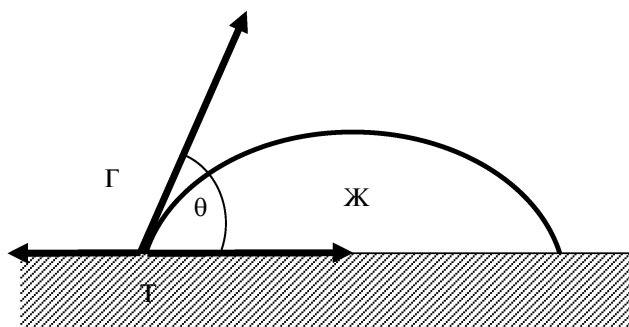


Рис. 1. Контактный угол (угол смачивания, краевого угла): Т — твердая фаза, Ж — жидкая фаза, Г — газовая фаза.

лишенных притока свежего органического вещества в течение многих лет [6].

Легкоразлагаемое органическое вещество, такое как и его прекурсоры (вещества-предшественники) — растительные остатки, в силу своего происхождения обладает более гидрофобной поверхностью по сравнению с почвенной минеральной массой [26, 33]. В связи с этим в последнее время активно исследуются гидрофобно-гидрофильные взаимодействия при изучении образования почвенной структуры и сохранения ею водоустойчивости.

Одна из гипотез, объясняющая механизм водоустойчивости макроагрегатов, предполагает наличие неупорядоченно распределенного гидрофобного органического вещества по поверхности внутриагрегатных пор, увеличивающего водоустойчивость агрегатов [11, 42]. О роли гидрофобных взаимодействий в почвах свидетельствует тот факт, что величина устойчивости почвенных агрегатов коррелирует с содержанием в почве гидрофобной фракции гумуса [21]. Водоустойчивость агрегатов при добавлении в почву неполярных жидкостей увеличивается, что можно объяснить гидрофобизацией их поверхности, и как следствие снижением смачиваемости [20].

При логически очевидном участии гуминовых веществ в процессах оструктурирования почв, физико-химическая природа этих явлений не ясна. Ганжара и Орлов [3] отмечают, что групповой и фракционный состав гумуса не позволяет идентифицировать агрономическую ценность его различных компонентов.

Вышеизложенные гипотезы были развиты в теорию о гидрофильно-гидрофобном характере гуминовых веществ, который позволяет им выступать структурообразователем и обеспечивать водоустойчивость агрегатов [11, 17].

Постоянно развивающаяся инструментальная техника, особенно современные методы коллоидной и органической химии, дают возможность изучения почвенных свойств на новом уровне и с

новых позиций. Одним из таких подходов является изучение свойств поверхности твердой фазы почвы, в частности, контактного угла смачивания на границе раздела почва—воздух—вода.

Контактный угол — термин, используемый в мировой научной литературе (contact angle), в российской литературе еще встречаются понятия: краевого угла и угол смачивания [13, 35]. При нанесении жидкости на твердую поверхность в газовой среде при формировании капли, образуются три поверхности раздела фаз: газ—твердая поверхность, газ—жидкость, жидкость—твердая поверхность (рис. 1). Угол θ , который образован касательными к межфазным поверхностям, ограничивающим смачивающую жидкость, и имеет вершину на линии раздела трех фаз, называется краевым углом, или углом смачивания, или контактным углом [13].

Величина контактного угла является характеристикой смачивания поверхности, при углах меньше 90° говорят о том, что поверхность смачивается, при значениях выше этого показателя, что не смачивается. При использовании в качестве жидкой фазы воды, для поверхности еще применяют термины “гидрофильная” (контактный угол $<90^\circ$) и “гидрофобная” (контактный угол $>90^\circ$). Кроме того, контактные углы, измеренные для жидкостей, сильно различающихся по полярности, позволяют вычислить величину поверхностной энергии [13].

Существуют работы по характеристике поверхности почвенных коллоидов и глинистых минералов с помощью контактных углов [35, 36], по оценке водопроницаемости почв и моделированию ее гидравлических свойств с привлечением данных о краевых углах [19, 20]. Отмечено изменение углов смачивания почвенных отдельных веществ при внесении сурфактантов или гидрофобных веществ [27, 32] и под воздействием пожаров [19]. В лабораторных экспериментах с почвами эвкалиптовых лесов Испании, Мексики и Австралии на основе измерения контактных углов и оценки устойчивости агрегатов показано, что при нагревании почв выше 200°C существенно снижаются величины контактных углов и стабильность агрегатов [44]. Полученный результат указывает на взаимосвязь смачиваемости агрегатов (оцениваемой величиной контактного угла) с их водоустойчивостью.

Для почв Германии в вариантах под лесом и пахотных, классифицированных как лювисоль, камбисоль и подзол (международная классификация [43]) с помощью корреляционного анализа показано, что водоустойчивость агрегатов больше определяется их поверхностными свойствами (смачиваемостью—водоотталкиванием), оцениваемой величиной контактного угла, нежели содержанием органического вещества [30].

Большинство процитированных работ, посвященных почвам и их контактными углам смачивания, написаны менее пяти лет назад. При этом в современной отечественной периодике упоминаний об измерении контактных углов не обнаружено (запрос в системе e-library.ru “контактный угол смачивания почвы” ничего не обнаружил при поиске в названии статей, аннотации и ключевых словах).

Таким образом, величины углов смачивания почв и ее структурных отдельностей изучены недостаточно. Вероятно, это связано с тем, что относительно простые методы измерения угла смачивания стали доступны только в последнее время с развитием компьютерной и цифровой видеотехники.

Прямой способ измерения контактного угла на поверхности раздела фаз — метод статической посаженной капли (Static Sessile Drope, SSD) — заключается в нанесении на ровную поверхность образца капли (для оценки смачиваемости водой) и измерении угла раздела фаз вода—поверхность на воздухе (угол θ на рис. 1). До недавнего времени метод был не применим для пористых веществ и порошков из-за влияния капиллярного впитывания на форму капли. Однако современные методы макровидеосъемки позволяют оценивать форму нанесенной на изучаемый объект капли в любой момент времени, даже в “нулевой момент” — когда капля уже находится на поверхности, но влияние впитывания на ее форму незначительно [35], что делает данный метод применимым для определения контактного угла смачивания почв.

Водоустойчивость агрегатов во многом определяется видом использования почв. Обычно с увеличением антропогенной нагрузки водоустойчивость структуры почвы снижается [6, 7, 28, 40, 41]. В связи с этим величины контактных углов смачивания, связанные с водоустойчивостью, могут, с одной стороны, служить численным выражением антропогенной нагрузки, а с другой, могут помочь глубже понять природу антропогенного воздействия на структуру почв.

Цель работы — определить контактные углы водоустойчивых и неводоустойчивых структурных отдельностей и сопоставить их с видом использования, гранулометрическим составом и зональной принадлежностью почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали образцы дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава (супесчаную и среднесуглинистую) и типичного чернозема тяжелосуглинистого. Для каждого подтипа почв исследовали вариант с целинной растительностью и пашней. Кроме того, использовали варианты многолетних опытов бес-

сменного чистого пара на дерново-подзолистой супесчаной почве и типичном черноземе. Образцы дерново-подзолистой супесчаной почвы отобраны в Мещерской низменности (Владимирская обл., Судогодский р-н) с вариантов длительного стационарного опыта Всероссийского научно-исследовательского института органических удобрений и торфа (ГНУ ВНИИОУ). В качестве пахотного варианта использовали опытную почву зернотравопропашного севооборота с внесением высоких доз навоза (в среднем 20 т/га в год), а также бессменного чистого пара (с 1968 г). Образцы целинной (многолетней залежной) почвы отбирали под лесом (ельником с примесью березы, возраст лесного массива примерно 80–100 лет) на участке, непосредственно прилегающем к опытному полю ГНУ ВНИИОУ.

Образцы дерново-подзолистой среднесуглинистой пахотной почвы отбирали на территории Московской обл. В пахотном варианте использовали многолетний опыт Центральной опытной станции ВНИИ удобрений им. Д.Н. Прянишникова зернотравопропашной севооборот. Образцы залежной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы отбирали в рядом расположенном лесном массиве (ельнике с примесью березы, возраст лесного массива примерно 80–100 лет). Расстояние между местами пробоотбора составило около 100 м, причем обе площадки располагались примерно на одинаковой высоте над уровнем моря.

Образцы типичного чернозема в пахотном варианте отбирали на длительном опыте Почвенного института им. В.В. Докучаева на территории Курского НИИ АПП варианты: бессменный картофель с внесением навоза 20 т/га в год и бессменный чистый пар, оба опыта заложены в 1964 г. В качестве непахотного варианта типичного чернозема использовали образцы, отобранные на участке ежегодно косимой степи в Центрально-Черноземном государственном биосферном заповеднике им. В.В. Алехина (Курская обл.).

Почвенный материал отбирали в виде индивидуальных образцов с сохраненной структурой. Каждый образец запаковывали в пакет таким образом, чтобы в него попала вся почвенная масса из объема отбора. Цель данного подхода — отобрать почвенные агрегаты в том соотношении, в котором они присутствуют в почве. Индивидуальные образцы обрабатывали отдельно (5 образцов на почву по 1–2 кг каждый, в случае дерново-подзолистой супесчаной — 2 образца по 2 кг), отбор осуществляли из слоя 0–15 см верхнего гумусового горизонта на площадке опробования радиусом 10 м.

Выделение водоустойчивых структурных агрегатов. Для получения водоустойчивых агрегатов использовали подход Савинова—Хана [14]. Из каждого индивидуального

образца методом сухого просеивания выделяли фракцию агрегатов 3–1 мм, из которых квартованием отбирали средний образец. Полученные из индивидуальных средние образцы объединяли и методом квартования [1] соединяли в итоговый образец, с которым в дальнейшем работали.

Навеску (3–5 г) полученных на предыдущем этапе агрегатов 3–1 мм размещали на сите 0.25 мм, ячейки которого предварительно увлажняли (сито погружали в дистиллированную воду и доставали не встряхивая). Дожидались когда вода, удерживаемая между ячейек сита, силами капиллярного поднятия увлажнит навеску агрегатов. Если влаги на ячейках было недостаточно (не вся навеска темнела), к низу сетки сита прикладывали переувлажненную фильтровальную бумагу (бумагу погружали в воду, затем давали излишней воде стечь) и достигали увлажнения агрегатов, ясно различимого глазом.

Для выделения водоустойчивых структурных отдельностей сито (с увлажненными агрегатами) погружали в дистиллированную воду и через 10 мин проводили просеивание путем десятикратных колебаний сита в воде вправо–влево на 45° и вверх–вниз. Водоустойчивые агрегаты (>0.25 мм) и фракцию меньше 0.25 мм (неводоустойчивые составляющие макроагрегатов) высушивали на водяной бане при температуре 90°C, растирали в агатовой ступке и просеивали через сито 0.25 мм. В полученных препаратах методом сухого сжигания на анализаторе АН-7529 определяли содержание органического углерода (С орг, %), а также контактный угол смачивания.

Подготовку образцов для определения контактных углов осуществляли согласно методике, описанной в литературе [18, 19]. На предметные стекла 7 × 2.5 см наклеивали двустороннюю липкую ленту, прямоугольниками, с длиной примерно 1.5–2.0 см и шириной 0.5–1.0 см. На верхний клеевой слой ленты наносили равномерным слоем анализируемый образец. Другим предметным стеклом образец придавливали с усилием с помощью гири 100 г в течение нескольких секунд, аккуратно стряхивали не приклеившиеся частички и вновь прижимали предметным стеклом. Процедуру повторяли 1–2 раза, добиваясь полного и равномерного заполнения поверхности.

Контактные углы определяли методом статической посаженной капли (static sessile drop) на гониометре Kruss DSA 100, оснащенном увеличивающей видеокамерой и программным обеспечением для анализа формы капли [35]. Суть метода заключается в следующем. Из расположенной над образцом иглы, выдавливается капля определенного объема, игла опускается вниз, приводя каплю в соприкосновение с измеряемой поверхностью. Затем игла поднимается, а капля остается на поверхности образца. Весь процесс регистри-

руется видеокамерой. Затем видеозапись анализируется специальным программным обеспечением, которое позволяет рассчитать контактный угол. Согласно рекомендациям для почвенных и впитывающих образцов [18, 35] контактный угол измеряли в начальный момент “посадки” капли на поверхность, который определяли как первый четкий кадр видео ряда после отрыва капли от подающей иглы. Аппроксимацию формы капли проводили методом Лапласа–Юнга (численный метод, когда подбирается полный контур капли с учетом межфазных взаимодействий и искажения контура под действием гравитации). Если это было невозможно, то проекцию капли в кадре аппроксимировали как окружность. Контактный угол определяли как наклон касательной к капле из точки касания трех фаз.

Объем капли составлял 1.5 мкл, использовали дистиллированную дегазированную воду, расстояние, которое проходила игла для посадки капли на поверхность образца, 0.8 мм. В работе использовали подготовленные образцы в воздушно-сухом состоянии. Среднее количество повторностей при измерении составило 11.

Следует подчеркнуть, что при подобном подходе — измельчении структурных отдельностей и измерении их контактных углов — определяют не внешнюю поверхность агрегатов, а усредненный показатель смачиваемости для всех частиц, составляющих этот агрегат.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы, вид их использования, содержание органического углерода и углы смачивания в выделенных из них структурных отдельностях (водоустойчивых агрегатов и неводоустойчивых частиц макроагрегатов) приведены в табл. 1.

При анализе полученных значений содержания Сорг для сравнения средних использовали критерий Вилкоксона–Манна–Уитни, согласно [4], при уровне значимости 0.05, объем выборки был от 3 до 5, для расчета применяли оригинальную программу CRITU — автор А.С. Фрид. В большинстве случаев содержание органического углерода в водоустойчивых структурных отдельностях было значимо выше по сравнению с неводоустойчивыми составляющими. Исключение составили два варианта: бессменный чистый пар на дерново-подзолистой супесчаной почве и вариант дерново-подзолистая среднесуглинистая под лесом. Возможно, в случае почвы под лесом это связано с большим содержанием корней в почве и пестротой почвенного покрова. В случае бессменного чистого пара на супесчаной дерново-подзолистой почве большее содержание С орг в неводоустойчивых структурных отдельностях связано с легким гранулометрическим составом почвы и

Таблица 1. Почвы, вид их использования, содержание углерода (С орг) и контактные углы смачивания (КУ) в водоустойчивых агрегатах и неводоустойчивых составляющих, выделяемых при просеивании в воде сухих агрегатов 3–1 мм

Почва	Вид использования	Структурные отдельности	С орг, %	КУ, град
Дерново-подзолистая супесчаная, Владимирская обл.	Целина (многолетняя залежь под лесом)	Водоустойчивые агрегаты	3.42	64
		Неводоустойчивые составляющие	0.51	51
	Пашня	Водоустойчивые агрегаты	2.37	33
		Неводоустойчивые составляющие	0.83	25
	Бессменный чистый пар	Водоустойчивые агрегаты	0.30	30
		Неводоустойчивые составляющие	0.52	28
Дерново-подзолистая среднесуглинистая, Московская обл.	Целина (многолетняя залежь под лесом)	Водоустойчивые агрегаты	3.49	85
		Неводоустойчивые составляющие	3.68	58
	Пашня	Водоустойчивые агрегаты	1.51	38
		Неводоустойчивые составляющие	0.84	16
	Бессменный чистый пар	Водоустойчивые агрегаты	4.99	70
		Неводоустойчивые составляющие	4.64	64
Чернозем типичный, тяжело-суглинистый, Курская обл.	Многолетняя залежь	Водоустойчивые агрегаты	4.99	70
		Неводоустойчивые составляющие	4.64	64
	Пашня	Водоустойчивые агрегаты	3.83	26
		Неводоустойчивые составляющие	3.18	14
	Бессменный чистый пар	Водоустойчивые агрегаты	3.15	14
		Неводоустойчивые составляющие	2.84	11

особенностями многолетнего опыта — бессменный пар. При просеивании в воде, песчаные частицы не проходили через сито 0.25, оставаясь во фракции, которую отнесли к водоустойчивым структурным отдельностям. Произошло “разбавление” водоустойчивых агрегатов песчаной фракцией, что вызвало относительное снижение показателя С орг, это стало заметно из-за низкого, менее процента, содержания углерода в почве данного варианта. В то же время при получении неводоустойчивых составляющих произошло их частичное обогащение С орг, за счет задержки ситом песчаных частиц >0.25 мм.

Величина контактного угла во фракции 3–1 мм водоустойчивых агрегатов значимо превышала этот показатель для неводоустойчивых составляющих (оценка по критерию Вилкоксона—Манна—Уитни [4] при $\alpha = 0.05$).

Для агрегатов из дерново-подзолистой супесчаной почвы Владимирской обл. под пашней и бессменным паром значимых отличий для контактных углов водоустойчивых агрегатов и неводоустойчивых составляющих не обнаружено. Вероятно, это объясняется легким гранулометрическим составом этих почв. С одной стороны, как показали многочисленные исследования [14, 15], структура почв более легкого гранулометрического состава по сравнению с более тяжелыми почвами менее устойчива к внешнему воздействию, в том числе к обработке. В результате деградации

почвы, вызванной обработкой, отличия в свойствах водоустойчивых и неводоустойчивых частиц становятся менее заметны и трудно обнаружимы. Поэтому в случае пахотного варианта опыта на легкосуглинистой почве еще можно отметить, что значения контактного угла в водоустойчивых структурных отдельностях больше по сравнению с неводоустойчивыми, а в бессменном пару это уже невозможно. С другой стороны, в супесчаных почвах преобладают крупные, относительно инертные вследствие малой величины удельной поверхности частицы, поэтому отличия в величинах контактных углов менее выражены.

Величины контактных углов структурных отдельностей в пределах почв одной разновидности (дерново-подзолистая супесчаная Владимирской обл., либо дерново-подзолистая среднесуглинистая Московской обл., либо чернозем типичный среднесуглинистый Курской обл.) демонстрировали зависимость от вида использования. Величины контактных углов водоустойчивых структурных отдельностей во всех случаях были больше в непахотных (залежных почвах). Так, в дерново-подзолистой супесчаной почве под лесом этот показатель составил 64°, а для пахотных вариантов 33° (пашня на севообороте) и 30° (бессменный чистый пар). В дерново-подзолистой среднесуглинистой почве под лесом водоустойчивые агрегаты имели контактный угол 85°, а в пахотном варианте 38°. В типичном черноземе

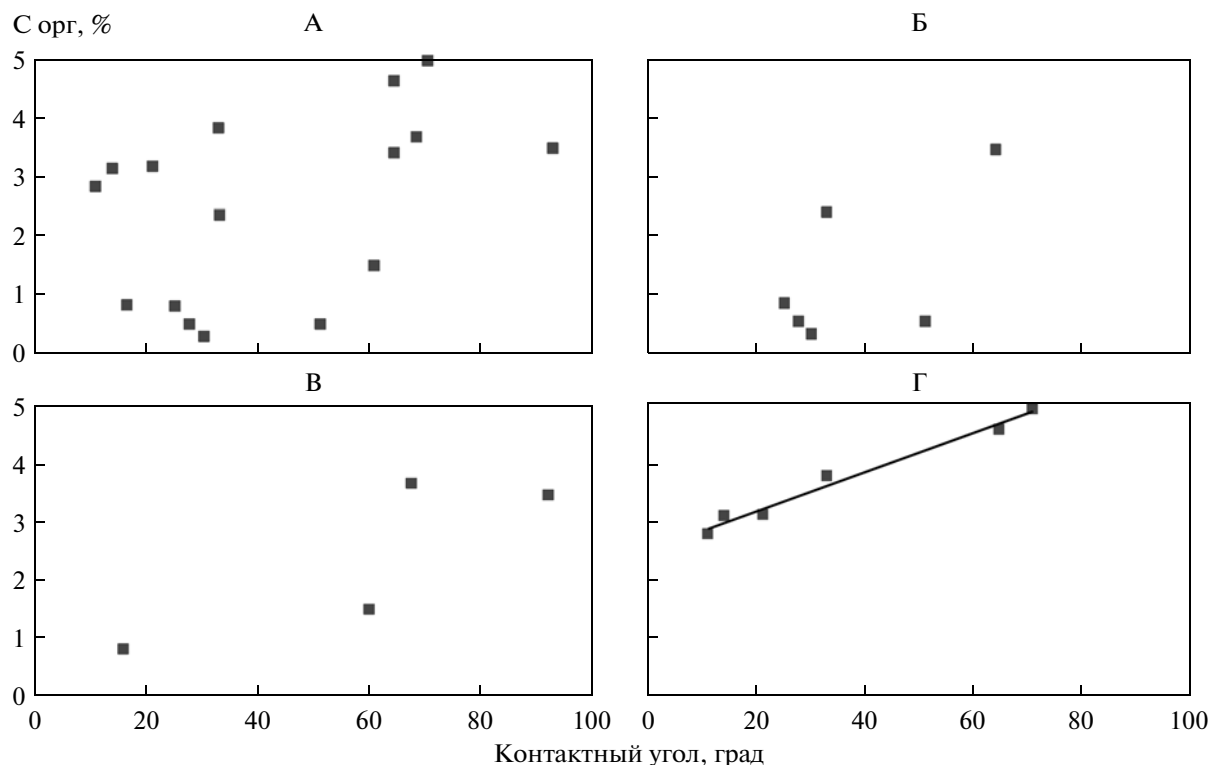


Рис. 2. Корреляционные поля зависимостей контактного угла от содержания органического углерода в структурных отдельностях изученных почв: А — все почвы; Б — дерново-подзолистая супесчаная; В — дерново-подзолистая средне-суглинистая; Г — чернозем типичный тяжелосуглинистый.

ежегодно косимой степи водоустойчивые агрегаты имели контактный угол 70° , а в случае пахотного и бесменного чистого пара 26° и 14° соответственно. Следует отметить, что значения контактных углов смачивания неводоустойчивых составляющих в необрабатываемых почвах были больше углов смачивания, определенных даже для водоустойчивых структурных отдельностей в пахотных вариантах. Эта закономерность прослеживается во всех рассмотренных разновидностях почв. Вероятно, наблюдаемую тенденцию можно объяснить тем, что при отсутствии обработки растительные остатки в почве дольше не разлагаются, сохраняют индивидуальность своей поверхности с высокими значениями контактных углов 60° – 138° [26, 33], что снижает смачиваемость почвенной массы. В связи с тем, что в общем случае органическое вещество может обладать большей гидрофобностью по сравнению с минеральной частью почв [11] и, соответственно, во многом определять величину контактного угла. Полученные величины были сопоставлены с содержанием углерода в структурных отдельностях. Для поиска корреляционных зависимостей сопоставляли как всю совокупность имеющихся данных, так и выборки, относящиеся к одной почве. Для наглядности, полученные корреляционные поля приводятся на рис. 2.

Для всей использованной в работе совокупности данных не выявлено значимой корреляции между величиной контактного угла и содержанием органического углерода (рис. 2, А), что указывает на наличие других факторов, влияющих на величину контактного угла. Видимо, в первую очередь следует предположить, что характер связи органического вещества с минеральной частью почвы будет определять эту величину. Таким образом, контактный угол будет зависеть от типа почвы, ее гранулометрического состава, вида использования и др.

Для дерново-подзолистой супесчаной почвы (рис. 2, Б) не выявлено корреляционной взаимосвязи с величиной контактного угла и содержанием органического углерода. Вероятно, это объясняется легким гранулометрическим составом почвы. В этой почве относительно мало тонкодисперсных частиц, соответственно поверхностные свойства во многом определяются грубой фракцией, и когда содержание органического вещества уменьшается ниже некоего значения, угол смачивания определяется исключительно свойствами супесчаной минеральной составляющей. В связи с этим обнаружить взаимосвязь между содержанием $C_{орг}$ и величиной контактного угла для данной выборки невозможно.

Таблица 2. Значимость вклада гранулометрического состава, вида использования почвы и устойчивости структурных отдельностей к разрушающему действию воды в величину контактного угла

Фактор	Значимость, α	F -тест
Гранулометрический состав	0.3273	1.0
Землепользование	0*	201.0
Водоустойчивость	6.24E-08	32.1
Гранулометрический состав × землепользование	7.39E-09	20.9
Гранулометрический состав × водоустойчивость	0.0269	5.0
Землепользование × водоустойчивость	0.0266	3.7
Все три фактора	0.2026	1.6

* Жирным шрифтом выделены значимые влияния факторов ($\alpha \leq 0.05$).

Для дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (рис. 2, В) можно отметить тенденцию увеличения значений контактного угла с возрастанием содержания углерода в структурных отдельностях, однако полученный коэффициент корреляции не является значимым.

Контактные углы структурных отдельностей тяжелосуглинистого типичного чернозема демонстрируют явную прямую взаимосвязь с содержанием углерода (рис. 2, Г). Коэффициент корреляции составил 0.99 и был значим при $\alpha = 0.001$.

Таким образом, при сопоставлении дерново-подзолистых почв и черноземов величина контактного угла явно определяется содержанием органического углерода только в типичном черноземе. Возможно, это объясняется большим количеством в черноземах органического вещества и доминированием мелкодисперсных составляющих в гранулометрическом составе. При таком сочетании все активные минеральные поверхности должны быть покрыты органическим веществом, и соответственно поверхностные свойства почвы определяются его количеством и качеством, в том числе и контактный угол смачивания. В случае же дерново-подзолистых почв, поверхностные свойства определяются еще и минеральной составляющей, кроме того эти почвы имеют иное строение органического вещества, что в комплексе определяет отсутствие явной взаимосвязи между углом смачивания и содержанием углерода.

Для выяснения факторов, оказывающих влияние на контактный угол смачивания структурных отдельностей, проведен многофакторный дисперсионный анализ [10]. В качестве факторов, предположительно оказывающих влияние на контактный угол (зависимая переменная), рассматривали гранулометрический состав (две градации: 1 — супесь, 2 — суглинок — в данном случае более дробные градации гранулометрического состава вводить было невозможно, так как они бы совпадали бы с подтипами почв), вид использова-

ния почвы (три градации: 1 — многолетняя залежь (целина), 2 — пашня, 3 — многолетний бессменный пар (экстремальная пашня без поступлений органических остатков в почву) и разделение составляющих агрегатов по устойчивости к разрушающему действию воды (две градации: 1 — водопропрочная, 2 — неводопропрочная). Результаты приведены в табл. 2.

Если уровень значимости (α) меньше 0.05 для F -теста, обычно считают, что влияние рассматриваемого фактора значимо, то есть нулевая гипотеза о $F < F_0$ отвергается [10]. В табл. 2 значимые факторы выделены жирным шрифтом. Величина F -критерия позволяет косвенно оценить значимость влияния фактора, чем она больше, тем более значимое влияние фактора, то есть нулевая гипотеза отвергается с большей вероятностью.

Многофакторный анализ показывает, что величина контактного угла связана с видом землепользования и принадлежностью структурных отдельностей к водоустойчивым или неводоустойчивым составляющим. Большее значение F -критерия указывает на большую значимость влияния первого фактора. Это можно интерпретировать как отражение того факта, что вид землепользования во многом определяет водоустойчивость [8].

Согласно многофакторному анализу, гранулометрический состав напрямую не оказывает воздействия на величины углов смачивания. Однако в сочетании с двумя другими рассматриваемыми факторами, этот показатель связан с контактными углами структурных отдельностей, вероятно, с одной стороны, во многом определяя водоустойчивость частиц [14], и, с другой, формируя отзыв почвы на вид ее использования [7, 8]. При этом величины F -критерия указывают на большую значимость связи гранулометрического состава и вида землепользования с величиной контактного угла по сравнению с гранулометрическим составом и водоустойчивостью.

Также выявлено совместное влияние землепользования и определяемой им водоустойчивостью на величину контактного угла, значимость этой связи наименьшая в ряду значимых бинарных факторов.

Совместного влияния всех трех факторов не обнаружено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали проведенные исследования, высокие значения контактных углов характерны для водоустойчивых структурных отдельностей почв. При этом отмечена слабая зависимость величин контактных углов от содержания углерода. Показано, что величины углов смачивания структурных отдельностей почв во многом определяются видом землепользования. При этом они больше в необрабатываемых почвах, обогащенных свежим органическим веществом растительного происхождения.

Выявленные взаимосвязи позволяют предположить, что наличие слаборазложившегося органического вещества оказывает существенное влияние на величину контактного угла: он тем больше, чем больше в почве слаборазложившихся растительных остатков.

Таким образом, измерение контактных углов почв является весьма информативным и экспрессным инструментом для изучения структурных отдельностей почв, их водоустойчивости, взаимосвязи с круговоротом углерода и антропогенным воздействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
2. Базыкина Г.С. Почвы степной и сухостепной зон в аномальных погодных условиях последних десятилетий // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2014. Вып. 73. С. 54–81.
3. Ганжара Н.Ф., Орлов Д.С. Процессы трансформации органического вещества в почвах и его качественный состав // Концепция оптимизации режима органического вещества почв в агроландшафтах. М.: Изд-во МСХА, 1993. С. 18–26.
4. Гублер Е.В. Вычислительные методы анализа и распознавания патологических процессов. Л.: Медицина, 1978, 296 с.
5. Кершенс М. Значение содержания гумуса для плодородия почв и круговорота азота // Почвоведение. 1992. № 10. С. 122–131.
6. Когут Б.М., Сысоев С.А., Холодов В.А. Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–562.
7. Кузнецова И.В., Азовцева Н.А., Бондарев А.Г. Нормативы изменения физических свойств почв степной, сухостепной, полупустынной зон европейской территории России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2011. Вып. 67. С. 3–19.
8. Кузнецова И.В., Уткаева В.Ф., Бондарев А.Г. Нормативы изменения физических свойств пахотных черноземов степной зоны Европейской России в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования // Почвоведение. 2014. № 1. С. 71–81. DOI: 10.7868/S0032180X14010067.
9. Медведев В.В. Структура почвы (методы, генезис, классификация, эволюция, география, мониторинг, охрана). Харьков: Изд-во 13 типография, 2008. 406 с.
10. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении практикум. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 84 с.
11. Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: Геос, 2009. 186 с.
12. Почвоведение. Почвы и почвообразование / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. М.: Высшая школа, 1988. Ч. 1. 400 с.
13. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии (поверхностные явления и дисперсные системы). М.: Химия, 1982. 400 с.
14. Хан Д. В. Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 140 с.
15. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
16. Шеин Е.В. Карпачевский Л.О. Толковый словарь по физике почв. М.: Геос, 2003. 126 с.
17. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53–61.
18. Bachmann J., Horton R. van der Ploeg R. R. Woche S. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil // Soil Sci. Soc. Am. J. 2000. V. 64. P. 564–567.
19. Beatty S.M., Smith J.E. Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils // J. Hydrology. 2010. V. 391. P. 97–108.
20. Biederbeck V.O. Using oil waste sludge disposal to conserve and improve sandy cultivated soils // In Proc. 1st Int. Symp. on Oil and Gas Exploration and Production Waste Management Practices. New Orleans, 1990.
21. Capriel T., Beck H., Borchert H., Harter P. Relation between aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass, and soil aggregate stability // Soil Sci. Soc. Am. J. 1990. V. 54. P. 415–420.
22. Chefetz B., Tarchitzky J., Deshmukh A.P., Hatcher P.G., Chen Y. Structural characterization of soil organic matter and humic acids in particle-size fractions of an agricultural soil // Soil Sci. Soc. Am. J. 2002. V. 66. P. 129–141.
23. Czachor H. Modelling the effect of pore structure and wetting angles on capillary rise in soils having different wettabilities // J. Hydrology. 2006. V. 328. P. 604–613.
24. Diamantopoulos E., Durner W. Physically-based model of soil hydraulic properties accounting for variable con-

- tact angle and its effect on hysteresis // *Advances Water Res.* 2013. V. 59. P. 169–180
25. *Elliott E.T.* Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1986. V. 50. P. 627–633.
26. *Fernandes P.E., Sao Jose J.F.B., Zerdas E.R.M.A., Andrade N.J., Fernandes C.M., Silva L.D.* Influence of the hydrophobicity and surface roughness of mangoes and tomatoes on the adhesion of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium and evaluation of cleaning procedures using surfactin // *Food Control.* 2014. V. 41. P. 21–26.
27. *Fernandez-Galvez J., Mingorance M.D.* Vapour and liquid hydrophobic characteristics induced by presence of surfactants in an agricultural soil // *Geoderma.* 2010. V. 154. P. 321–327.
28. *Gajic B., Dugalic G., Diurovic N.* Comparison of soil , organic matter content aggregate composition and water stability of gleyic fluvisol from adjacent forest and cultivated areas // *Agronomy Research.* 2006. V. 4(2). P. 499–508.
29. *Garcia-Oliva F., Oliva M., Sveshtarova B.* Effect of soil macroaggregates crushing on C mineralization in a tropical deciduous forest ecosystem // *Plant and Soil.* 2004. V. 259(1–2). P. 297–305.
30. *Goebel M.O., Woche S.K., Bachmann J.* Quantitative analysis of liquid penetration kinetics and slaking of aggregates as related to solid-liquid interfacial properties // *J. Hydrology.* 2012. V. 442. P. 63–74.
31. *Jastrow J.D.* Soil aggregate formation and the accrual of particuney, mineral associated organic matter // *Soil Biol. Biochem.* 1996. V. 28. P. 657–676.
32. *Muller K., Deurer M.* Review of the remediation strategies for soil water repellency // *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 2011. V. 144. P. 208–221.
33. *Pogorzelski S.J., Rochowski P., Szurkowski J.* *Pinus sylvestris* L. needle surface wettability parameters as indicators of atmospheric environment pollution impacts: Novel contact angle hysteresis methodology // *Appl. Surf. Sci.* 2014. V. 292. P. 857–866.
34. *Rawson A., Murphy B.* The Greenhouse Effect, Climate Change and native vegetation. Background paper No 7. Native vegetation Advisory Council NSW Department of Land and Water Conservation. 2000.
35. *Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L.* Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids // *J. Colloid Interface Science.* 2008. V. 256. № 1. P. 299–307.
36. *Shang J.Y., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L.* Contact angles of aluminosilicate clays as affected by relative humidity and exchangeable cations // *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects.* 2010. V. 353. P. 1–9.
37. *Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil and Tillage Research.* 2004. V. 79. P. 7–31.
38. *Six J., Elliott E.T., Paustian K., Doran J.W.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1998. V. 62. P. 1367–1377.
39. *Six J., Elliott E.T., Paustian K.* Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1999. V. 63. P. 1350–1358.
40. *Six J., Elliott E.T., Paustian K.* Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture // *Soil Biol. Biochem.* 2000. V. 32. P. 2099–2103
41. *Six J., Paustian K., Elliott E.T., Combrink C.* Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. V. 64. P. 681–689.
42. *Sullivan L.A.* Soil Organic Matter, Air Encapsulation and Water-Stable Aggregation // *J. Soil Sci.* 1990. V. 41. P. 529–534.
43. World Reference Base for Soil Resources. A framework for international classification, correlation and communication, Word Soil Resource Report 103. FAO. Rome, 2006. 145 p.
44. *Zavala L.M., Granged A.J.P., Antonio Jordán A., Bárcenas-Moreno G.* Effect of burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions // *Geoderma.* 2010. V. 158. P. 366–374.