

УДК 631.4

## ИЗМЕНЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ФРАКЦИЙ АГРЕГАТОВ В ГУМУСОВЫХ ГОРИЗОНТАХ ЧЕРНОЗЕМОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2019 г. В. А. Холодов<sup>1,2,\*</sup>, Н. В. Ярославцева<sup>1</sup>, Ю. Р. Фарходов<sup>1,2</sup>, В. П. Белобров<sup>1</sup>,  
С. А. Юдин<sup>1</sup>, А. Я. Айдиев<sup>3</sup>, В. И. Лазарев<sup>3</sup>, А. С. Фрид<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы

<sup>3</sup>Курский НИИ АПП, Россия, 305526, Курская область, Курский район, пос. Черемушки, 10

\*e-mail: vkholod@mail.ru

Поступила в редакцию 05.02.2018 г.

После доработки 31.05.2018 г.

Принята к публикации 26.08.2018 г.

Проанализированы данные о распределении структурных отдельностей естественного сложения гумусовых горизонтов черноземов. Использован метод главных компонент с центрированной логарифмической трансформацией исходного набора данных. На основе расположения опытных вариантов в пространстве главных компонент и анализа величин собственных векторов выявлены группы размерных фракций структурных отдельностей, изменение содержания которых отражает деградиционные или восстановительные процессы. Эти группы хорошо соответствовали частным логнормальным распределениям. Определено распределение водоустойчивых агрегатов во всех крупных фракциях от >10 и до 3 мм. Комплексный анализ полученных данных и выявленные взаимосвязи позволяют предположить концептуальный механизм восстановления структуры черноземов: при распашке, вследствие дробления, образуются частицы <0.25 мм, которые могут слипаться в неводоустойчивые макроагрегаты и глыбы >10 мм. При снятии нагрузки глыбы и крупные агрегаты, взаимодействуя со свежепоступившим органическим веществом, приобретают водоустойчивость, при этом со временем структурные отдельности >10 мм практически все переходят в более мелкие размерные категории.

*Ключевые слова:* Chernozems, структура почвы, многолетние полевые опыты, метод главных компонент, композитные данные, центрированная логарифмическая трансформация, the centred logratio transformation

DOI: 10.1134/S0032180X19020060

### ВВЕДЕНИЕ

Под структурой почвы понимают ее физическое строение на уровне горизонта, обусловленное размером, формой, количественным соотношением, характером взаимосвязи и расположением, как элементарных почвенных частиц, так и состоящих из них агрегатов. В качестве основных структурных составляющих, прежде всего, выделяют гранулометрический, минералогический и агрегатный составы [6]. Для верхних гумусовых горизонтов структура во многом определяет такие важнейшие свойства, как устойчивость почвы к действию неблагоприятных факторов окружающей среды и потенциальное плодородие. Структурные отдельности физически защищают заключенное в них органическое вещество от разложения, что значимо снижает скорость его минерализации. При распашке происходит разрушение агрегатов, высвобождение внутриагрегат-

ного органического вещества и его разложение [27]. В настоящее время наиболее распространенным и удобным подходом для изучения структуры гумусовых горизонтов почвы является концепция “Иерархической организации почвенной структуры” [26–29]. Она в целом повторяет взгляд отечественного почвоведения на то, что почвенные структурные отдельности состоят из агрегатов разных порядков [9]. При этом ориентирована на почвы, широко используемые в земледельческой практике, с одной стороны, это ее ограничивает, но, с другой, делает более строгой, позволяет оперировать четкими размерами структурных отдельностей и легче интерпретировать получаемые данные. Концепция считается применимой к почвенным горизонтам тяжелого гранулометрического состава, содержащим органическое вещество, которое является основным агентом структурообразования, на фоне

доминирования в почве глинистых минералов с решеткой типа 2 : 1. Согласно концепции, структура почвы иерархически организована: частицы <20 мкм связываются в микроагрегаты 20–250 мкм, которые в свою очередь образуют макроагрегаты >250 мкм. При этом связывающие агенты для иерархических единиц разные, и прочность образующихся структур (энергия связи) уменьшается с увеличением их размера. Например, связь компонентов, составляющих органо-минеральные частицы, гораздо прочнее, чем между самими частицами, когда они образуют микроагрегат. Частицы илистого размера связываются в микроагрегаты стойкими клеящими веществами, такими как гуминовые вещества и поливалентные катионные комплексы. В свою очередь формирование макроагрегатов из микроагрегатов происходит под действием временных, короточных связующих агентов, к ним относят гифы грибов, корни и полисахариды микробного и растительного происхождения. Этим объясняется большая устойчивость микроагрегатов к виду использования почвы по сравнению с макроагрегатами. Для иерархических единиц существует зеркальная иерархия почвенных пор: макропоры (трещины), поровое пространство между макроагрегатами, поры между микроагрегатами, но внутри макроагрегатов; поры внутри микроагрегатов. Следует отметить, что в приведенном отечественном определении структуры, как организации пространства на уровне горизонта, к ней относятся как распределение частиц по размерам, так и поровое пространство.

Кроме того, для почвы действует принцип исключения пористости (*porosity exclusion principle*). Согласно ему, в структурных отдельностях более низкого порядка невозможны (исключены) поры агрегатов более высокого порядка, а для эффективного действия, размер связующих агентов должен быть комплементарен скрепляемым иерархическим единицам. Например, растворенные органические вещества образуют элементарные почвенные частицы (ЭПЧ), коллоидные гуминовые вещества подходят для образования микроагрегатов, а гифы грибов – для макроагрегатов.

Растворенные органические вещества напрямую не могут скреплять микроагрегаты в макро. При этом они могут влиять на свойства ЭПЧ из которых формируются микроагрегаты с повышенной адгезией сами могут служить связующим агентом макроагрегатов [21, 26, 29].

К недостаткам концепции можно отнести то, что при ее разработке практически не принимали в расчет естественное распределение воздушно-сухих агрегатов в почве (распределение агрегатов естественного сложения), оцениваемое просеиванием на воздухе. Практически все работы про-

водили на основе распределения водоустойчивых агрегатов, получаемых при просеивании в воде. Так, в широко цитируемой работе [28], почву полевой влажности сразу после отбора аккуратно пропускали через сито с диаметром 8 мм, затем высушивали на воздухе и после оценивали структуру по распределению водоустойчивых агрегатов.

В русской школе почвоведения также считали распределение воздушно-сухих агрегатов в гумусовых горизонтах почв малоинформативным. В свое время было показано, что в целом почвенные структурные отдельности состоят из агрегатов разных порядков [9]. Наиболее ярко эта особенность описана для иллювиальных горизонтов почв, а для гумусовых и, тем более пахотных, неоднородность, проявляемая в структуре распределения агрегатов, и их качественные различия отмечены не достаточно.

В работе [20], посвященной структуре гумусовых горизонтов почв, при анализе содержания органического вещества в воздушно-сухих агрегатах не обнаружено четкой взаимосвязи между этим показателем и размерными фракциями почвы. В то же время автор выявил прямую взаимосвязь между содержанием органического вещества и размерами водоустойчивых агрегатов. В целом этот взгляд общепринят в настоящее время, как в зарубежном, так и в российском почвоведении.

В работе [3] предпринята одна из первых попыток изучить распределение агрегатов в почве, а не описывать ее структуру с помощью 1–2 дескрипторов, таких как средневзвешенный диаметр агрегатов или коэффициент структурности [23]. В частности показано, что распределение воздушно-сухих агрегатов в почве по размерам хорошо описывается логнормальным распределением. При этом авторы указывают, что такое распределение характерно для частиц, получаемых при дроблении [12]. К сожалению, не была проведена проверка гипотезы, что в почвах, в которых не проводили обработку (отсутствовало дробление), распределение агрегатов не будет соответствовать логнормальному, тогда это был бы значимый диагностический признак. Вероятно, это связано с отсутствием доступа к вычислительным мощностям в момент исследования. Однако в настоящее время в связи с развитием компьютерной техники, таких затруднений нет. В почве помимо дробления, безусловно существует процесс склеивания структурных отдельностей в более крупные образования, в связи с этим распределение агрегатов не всегда можно описать как логнормальное.

Таким образом, в настоящее время недостаточно внимания уделяется изучению распределения воздушно-сухих структурных отдель-

стей в почве, при этом экспрессность метода на фоне доступности разнообразных математических подходов к обработке данных делает его весьма перспективным, особенно для оценки состояния структуры в гумусовых горизонтах при разном использовании почв.

Для извлечения максимальной информации из данных распределения воздушно-сухих структурных отдельностей типичных черноземов разного вида использования были применены элементы системного подхода. Вся совокупность почвенных структурных отдельностей рассматривалась как отдельная система. Эта система существует как подсистема в почвенной системе. Это открытая подсистема, она обменивается веществом и энергией с окружающим пространством.

При рассмотрении системы структурных отдельностей исходили из предположения, что она относится к эквифинальным системам, которые способны достигать заранее определенного конечного (финального) состояния независимо от изменения начальных условий, то есть из различных начальных состояний и разными путями [4, 18]. При этом в случае типичных черноземов разного вида использования — объектов исследования — финальным состоянием является не затронутая человеческим вмешательством степь и, соответственно, для рассматриваемой подсистемы — распределение в ней структурных отдельностей. Это дает возможность качественно оценивать наблюдаемые в системах процессы: деградацию и восстановление.

В основу работы положено предположение, что структурные отдельности естественного сложения гумусовых горизонтов имеют разные свойства и по-разному реагируют на внешнее воздействие или его отсутствие. Их распределение осуществляет поддержание функции устойчивости почвенной структуры. Поэтому изменение распределение фракций в зависимости от вида использования будет отражать реакцию системы на внешнее воздействие, а при снятии нагрузки, релятивизировать ее эквифинальность.

Цель работы — выявить и описать изменения в распределении структурных отдельностей как отклик гумусовых горизонтов типичных черноземов на антропогенные нагрузки разной интенсивности и ее снятие. Для большей определенности рассматриваемых систем использовали образцы типичных черноземов многолетних полевых опытов — систем с высоко детерминированными условиями.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Рассматривали типичные черноземы Курской области многолетних полевых опытов, различающихся интенсивностью воздействия на почву.

**Отбор образцов.** Образцы типичного чернозема [10] (согласно международной классификации [31] — *Naptic Chernozem (Loamic, Pachic)*) отбирали на длительном многолетнем полевом опыте на территории Курского Научно-исследовательского института агропромышленного производства (НИИ АПП). Дополнительно, в качестве примера ненарушенного чернозема, отбирали образцы с многолетнего опыта “Ежегодно косимая степь” Центрально-черноземного государственного биосферного заповедника им. В.В. Алехина, участок расположен на территории заповедной Стрелецкой степи. Ниже приводится описание опытов. Большинство образцов, если это отдельно не оговорено, отобрано в 2015 г.

*Бессменный черный пар* с 1964 г. (пар — здесь и далее в скобках приводится краткое название опытного варианта, используемое в тексте) представляет собой участок, на котором почву ежегодно обрабатывают (перепашивают с оборотом пласта), не засевают и не допуская появления сорняков; таким образом, на этом поле с 1964 г. в почву практически не поступало свежее органическое вещество.

*Залежь с 1998 г. после бессменного черного пара* с 1964 г. (залежь): часть участка вышеописанного многолетнего опыта, который с 1998 г. перестали обрабатывать, отвели под залежь. В настоящее время зарос ковылем. Этот вариант позволяет анализировать восстановление почвы в течение 17 лет после экстремальных нагрузок.

*Бессменный картофель* с 1964 г. без внесения удобрений (картофель).

*Бессменная кукуруза* с 1964 г. с внесением минеральных удобрений (кукуруза), на этом участке до 1991 г. применяли симазин.

*Бессменная пшеница* с 1964 г. с внесением минеральных удобрений (пшеница).

Зернопаропропашной севооборот с внесением минеральных удобрений с 1964 г. (севооборот), чередование культур: пар, озимая пшеница, сахарная свекла, кукуруза, ячмень. Отбор образцов — после ячменя.

Прямой посев с 2013 г., четырехпольный зерновой севооборот (No-till). Опыт заложен в 2013 г. На том же поле в том же году в качестве контроля организован аналогичный севооборот, но с традиционной системой обработки (контроль к No-till). В год закладки опыта на поле провели уравнительный посев из овсяно-гороховой смеси. Отбор образцов проводили в 2017 г. после завершения первой ротации. Чередование культур: озимая пшеница, кукуруза на зерно, ячмень, занятый пар (горохо-овсяная смесь).

Лесополоса с 1964 г., разграничивающая опытные поля (лесополоса) — вариант, в котором структура восстанавливается под воздействием лесной растительности и который при сравни-

тельной оценке с пахотными черноземами демонстрирует высокие показатели структурности [19]. Отбор образцов – 2017 г.

**Методика отбора образцов.** На опытном варианте закладывали площадку опробования радиусом 5 м. В центре с помощью GPS-навигатора определяли координаты, образцы отбирали в пяти точках: в центре и четырех точках в радиусе 5 м от центра со сдвигом на  $90^\circ$  для каждой точки относительно предыдущей (метод конверта). В качестве образца отбирали полный объем, занимаемый почвой  $15 \times 15 \times 25$  см, массой около 5 кг, с глубины 0–15 см. Такой подход позволяет избежать потерь и искусственного перераспределения размерных фракций агрегатов. Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния.

**Анализ образцов.** Пять воздушно-сухих индивидуальных образцов для каждого варианта анализировали отдельно, затем вычисляли средневзвешенное значение для искомого показателя. Сухое просеивание проводили по методу Саввинова [5]. Использовали набор сит 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0 и 10.0 мм, через который пропускали каждый индивидуальный образец.

Для оценки водостойчивости использовали подход Хана [11, 20], согласно которому в воде просеивают не весь образец почвы, а агрегаты целевой размерной фракции (обычно 2–1 или 3–1 мм). Следует отметить, что обоснованность выбора целевой фракции часто осуществляется, исходя из запаса углерода во фракции [11]. Методика просеивания в воде в целом была общепринятой [5]. Отличие заключалось в том, что агрегаты предварительно увлажняли для вытеснения из пор защемленного воздуха, чтобы избежать разрывов агрегатов при резком погружении в воду [23]. Процедура была следующей. Навеску сухих агрегатов помещали на сито, ячейки которого предварительно были увлажнены (для этого сито на 1 мин погружали в дистиллированную воду и доставали не встряхивая). Дожидались когда вода, удерживаемая между ячейек сита, увлажнит навеску агрегатов. Если влаги на ячейках сита было недостаточно, к сетке сита снизу прикладывали перувлажненную фильтровальную бумагу (бумагу погружали в воду, давали излишней воде стечь). Затем сито с агрегатами погружали в дистиллированную воду на 10 мин. По истечении этого времени проводили просеивание в воде путем повторяемых 10 раз колебаний сита в воде вправо–влево и вверх–вниз. Фракционированные структурные отдельные высушивали и взвешивали.

**Интерпретация результатов.** Для интерпретации использовали метод главных компонент (МГК, англ. principal component analysis, PCA). МГК – удобный подход для поиска неявных взаимосвязей и выявления наблюдений (в данном случае размерных классов структурных отдельно-

стей), вносящих наибольший вклад в различия между объектами (видами использования черноземов) и выявления тенденций к накоплению той или иной фракции в зависимости от варианта многолетнего опыта. В связи с тем, что результаты агрегатного состава являются композитными данными, сумма которых равна постоянной величине, в данном случае 100%, применение МГК к ним без преобразования некорректно [8, 24, 25]. Поэтому исходный набор данных преобразовывали с помощью центрированной логарифмической трансформации (the centred logratio transformation) в рабочую матрицу данных  $clr(x)$  [25], согласно уравнению

$$clr(x) = [\lg\{x_1/g(x)\}, \dots, \lg\{x_i/g(x)\}],$$

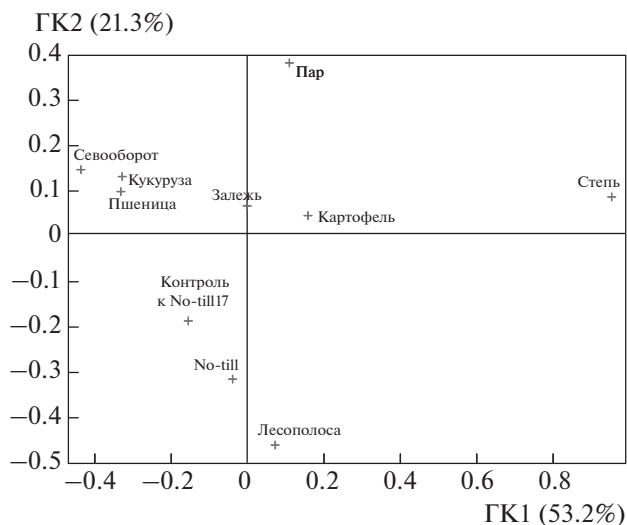
где  $x$  – исходные данные,  $g(x)$  – их геометрическое среднее.

Для построения пространства МГК использовали матрицу ковариаций.

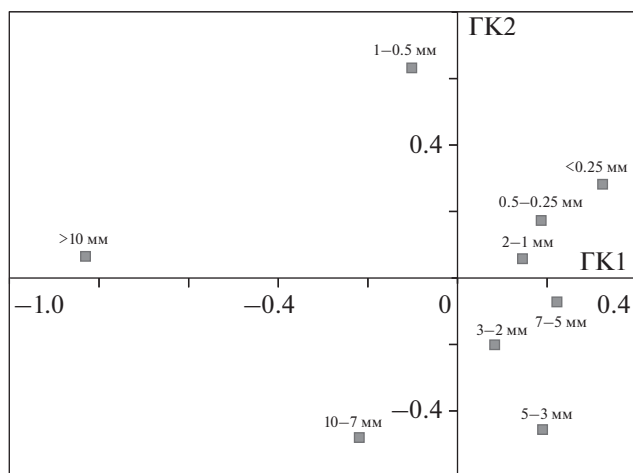
Для анализа структуры распределения агрегатов естественного сложения исходные данные были наложены на логнормальную шкалу размеров для выявления частных распределений. За границы частных распределений принимали минимумы на получившейся кривой [3].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение черноземов разного вида использования на основе результатов сухого просеивания в координатах первых двух главных компонент (ГК) приводится на рис. 1. Первые две ГК описывают 74.5% вариации рассматриваемых характеристик объектов. При этом на первую главную компоненту (ГК1) приходится 53.2%, а на вторую (ГК2) – 21.3%. В связи с этим третью и последующие ГК не рассматривали [1, 7]. По ГК1 разделяются два крайних варианта степь и севооборот. Другие почвы составляют группы, хорошо отличимые от этих двух крайних объектов. Можно выделить группу с наиболее деградированной структурой, в нее входят пар и картофель, затем группу восстанавливающихся почв (залежь, No-till, лесополоса), и группу, в которую входят контроль к No-till, варианты кукуруза и пшеница. При двумерном рассмотрении пространства вариации признаков, то есть при добавлении ГК2, видно, что все варианты хорошо распределяются в выбранной системе координат. Группы, плохо различимые по ГК1, хорошо разделяются по ГК2. Контрастными вариантами для ГК2 являются пар и лесополоса. Интересно сопоставить варианты No-till и контроль к нему. За четыре года полевого опыта произошло смещение по обеим ГК. По ГК1 вариант No-till приблизился к варианту залежь, а по второй сместился в сторону лесополосы.



**Рис. 1.** Распределение черноземов разного вида использования в координатах главных компонент на основе содержания структурных отдельностей по результатам сухого просеивания.



**Рис. 2.** Коэффициенты собственных векторов для структурных отдельностей в пространстве ГК.

Следует отметить, что по ГК1 восстанавливаемые почвы весьма близки друг к другу, несмотря на то, что No-till используется 4 года, залежь – 16 лет, а лесополоса – 53 года. При этом все три варианта далеки от ненарушенного чернозема – степь.

Оценить вклад структурных отдельностей в распределение черноземов разного вида использования в пространстве ГК можно с помощью коэффициентов их собственных векторов. Для наглядности они приводятся на рис. 2. Видно, что по величинам ГК1 наибольший вклад в различия между черноземами вносит содержание глыб >10 мм и частиц <0.25 мм. Максимальное значение (по модулю) у собственного вектора глыб, он находится в отрицательной части ГК1. Там же расположены

агрегаты 10–7 и 1–0.5 мм, при этом их вклад в различия почв гораздо меньше по сравнению с глыбистыми частицами. Все остальные структурные отдельности расположены в положительной части ГК1. Видимо, это указывает на происхождение глыбистых частиц из всех агрегатов, которые разрушаются при обработке.

По второй ГК максимальные значения собственных векторов имеют агрегаты 10–7 и 1–0.5 мм. Следует обратить внимание, что отрицательные значения для ГК2 встречаются только у собственных векторов крупных агрегатов (все агрегаты от 10 до 2 мм). Кроме того, крупные агрегаты от 2 до 7 мм занимают отдельную четверть пространства ГК (с положительными значениями ГК1 и отрицательными ГК2), что говорит об их близости.

В другой сектор (с положительными значениями для ГК1 и ГК2) попадают агрегаты 2–1 мм и мелкозем от 0.5 до 0.25 мм. Таким образом, в пространстве ГК явно видна неоднородность в распределении агрегатов разных размеров. Агрегаты 10–7 и 1–0.5 мм следует отнести к переходным вариантам, наиболее изменчивым и поэтому вносящим существенный вклад в различия черноземов, однако следует отметить, что фракция 1–0.5 мм имеет самое низкое содержание и для нее характерна самая высокая аналитическая погрешность, поэтому роль ее дискуссионная.

Сопоставляя положение варианта чернозема и собственных векторов структурных отдельностей, можно выявить неоднородность в проявлении отклика структуры на вид использования почв.

По ГК1 вариант степь наиболее отделен от всех остальных. При этом в смещение в отрицательную область ГК1 наибольший вклад вносит увеличение содержания глыб >10 мм, этот процесс можно рассматривать как характерный для распашки почв. Похоже, но гораздо менее выражено, ведут себя агрегаты 10–7 мм. Другой ярко выраженный процесс для ГК1 – накопление частиц <0.25 мм, вызывающий сдвиг вариантов в положительную область. Схожее влияние, но в еще меньшей степени, оказывают крупные от 3 до 7 мм и мелкие агрегаты 0.5–0.25 мм.

Рассматривая группы, выделяемые по ГК1, можно отметить, что они разделяются по выраженности антропогенного воздействия на почву. Степь – воздействие отсутствует; залежь, No-till, лесополоса – обработки в данный момент нет, либо антропогенное воздействие направлено на сохранение структуры; контроль к No-till, севооборот, варианты кукуруза и пшеница – традиционные севообороты с весомой долей злаковых культур; пар и картофель – экстремальные виды использования почвы, ведущие к деградации структуры. Таким образом, ГК1 разделяет виды

использования почв на основе выраженности деградационных процессов.

Напротив, ГК2 в большей мере отражает различия черноземов по выраженности в них восстановительных процессов. Действительно, вариант залежь очень мало отличается от пара по ГК1, в то же время они существенно разнесены по ГК2, причем залежь за 17 лет сдвинулась в сторону отрицательных значений. Опыт лесополоса, на которой 53 года не проводили обработки, является крайним вариантом, также в отрицательных значениях ГК2. При сравнении варианта No-till и пропашного контроля к нему виден сдвиг в отрицательную область структуросберегающего вида использования. Таким образом, в выбранной системе координат восстановительные процессы отражаются по ГК2.

Рассмотрение собственных векторов структурных отдельностей показывает, что восстановительные процессы сопровождаются увеличением количества агрегатов 10–7 мм (чуть в меньшей степени 5–3 мм, то есть крупных агрегатов) и уменьшением содержания мелких агрегатов 1–0.5 мм. Примечательно, что все агрегаты >2 мм расположены в отрицательной зоне ГК2, это указывает, что в той или иной степени их накопление сопровождается восстановлением структуры почв после механических нагрузок. При этом восстановление сопровождается снижением содержания структурных отдельностей <1 мм. Схожие тенденции отмечали при изучении залежных хронорядов черноземов [2].

В рассматриваемом процессе значимо не участвуют агрегаты 2–1 мм и глыбы >10 мм. По ГК2 они имеют минимальные значения собственных векторов 0.058 и 0.065 соответственно.

Следует отметить, что агрегаты 2–1 мм практически не вносят вклад в различия видов использования по обеим ГК. Вероятно, этот размер агрегатов наиболее устойчив при обработке черноземов и наименее изменчив. Этим можно объяснить полное или локальное доминирование данной фракции в гумусовых горизонтах черноземов, отмеченное для всего набора данных.

В результате, на основе их отклика на воздействие, в агроценозе можно выделить следующие группы:

>10 мм – содержание увеличивается при распашке;

10–2 мм – содержание увеличивается при восстановлении структуры после механических нагрузок, снижается при распашке;

2–1 мм – содержание практически не меняется;

<1 мм – при восстановлении снижается;

<0.25 мм – снижается при распашке и увеличивается при восстановлении структуры.

Вывод, полученный для частиц <0.25 мм, неоднозначный. В целом приводимые в литературе данные свидетельствуют о небольшом изменении этой фракции при распашке по сравнению с весьма существенным увеличением глыбистых частиц >10 мм [13, 14, 16]. Например, при исследовании структуры агроценозов Каменной степи для многолетней залежи отмечен 1% содержания этой фракции, а в столетнем хроноряду пахотных почв от 1 до 6%, при среднем значении 3% [16]. В нашем исследовании наиболее близкими значениями этой фракции были у крайних вариантов: степь (7%) и пар (6%), остальные почвы занимали промежуточное положение. Объяснить это можно тем, что при распашке возникает много неводоустойчивых частиц <0.25 мм, которые слипаются в глыбы >10 мм, вовлекая в этот процесс часть изначально присутствующих в почве частиц <0.25 мм. В результате при сухом ситовом анализе фиксируется увеличение содержания глыб и небольшое уменьшение содержания частиц <0.25 мм.

Для выявления структуры распределения агрегатов использовали подход, разработанный Березиным с соавт. [3]. Ими показано, что в распределении агрегатов при сухом просеивании можно выделить частные распределения, подчиняющиеся логнормальному закону. Этот подход основан на фундаментальной работе Колмогорова [12], в которой показано, что распределение частот частиц по размерам при случайном дроблении является логнормальным. Однако следует иметь в виду, что “неоднородность почвенного материала, неоднозначность межчастичных связей, неопределенность времени действия разрушающих факторов на почвенные компоненты различной стабильности, должны, в значительной мере, нарушать теоретически идеальный вывод А.Н. Колмогорова в применении его к реальной полидисперсной, гетерогенной системе – почве” (цит. по [3]).

Были построены графики зависимости содержания структурных отдельностей (%) от нормальных логарифмов их средних диаметров (мкм) (рис. 3). Для наглядности по оси абсцисс приводятся размеры структурных отдельностей в миллиметрах.

Отличия между почвами в логнормальном представлении по сравнению с МГК видны не явно. Однако для структурных отдельностей на основе минимумов можно выделить четыре частных распределения:

1 – с границами меньше 0.75 мм (соответствует размерным фракциям <1 мм);

2 – от 0.75 до 2.5 мм (2–1 мм);

3 – 2.5–8.5 мм (2–10 мм);

4 – больше 8.5 мм (>10 мм).

Следует отметить, что первое отнесение примерно соответствует пределам, выделенным в ра-

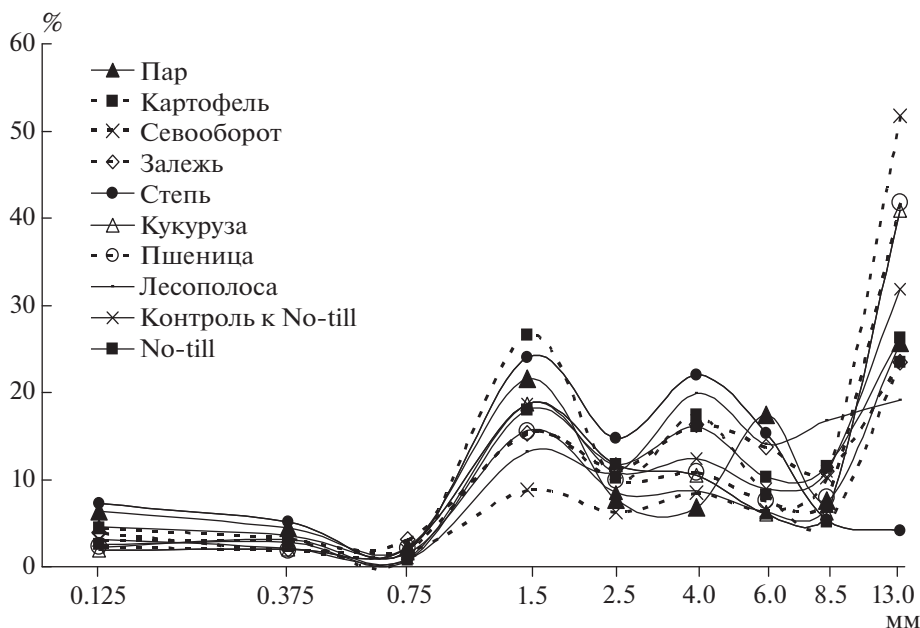


Рис. 3. Распределение структурных отдельностей на логарифмической шкале размеров.

боте [3], 90 до 900 мкм, а три других входят в распределение частиц больше >900 мкм. Возможно, это связано с тем, что авторы использовали менее дробный набор сит – 3 точки по сравнению с излагаемыми данными (6 точек). В результате ими получено одно распределение вместо трех, впрочем, целью цитируемой работы не было подробное изучение распределения макроагрегатов.

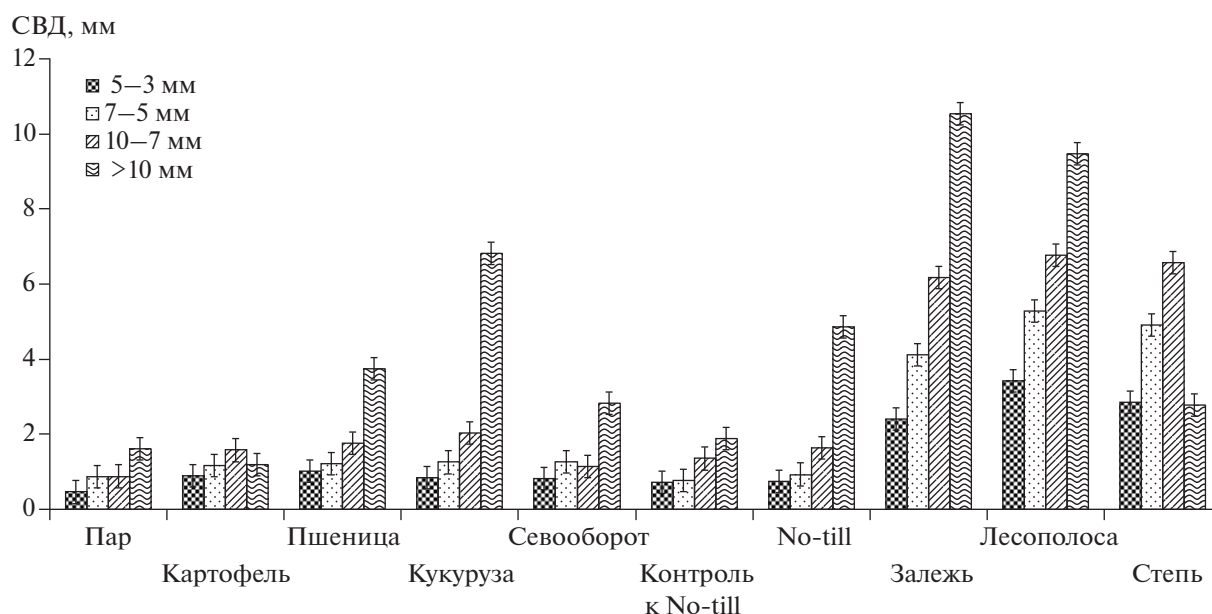
Полученные группы соответствуют фракциям, выделяемым на ситах: <1, 2–1, 10–2 и >10 мм, что хорошо согласуется с описанными выше МГК оценками вкладов групп агрегатов на основе собственных векторов.

Следует отметить, что традиционно при ситовом анализе размерная дискретность фракций не одинакова: структурные отдельности выделяют с шагом 0.25, 0.5, 1, 2 и 3 мм. В связи с этим в полученные распределения вносится известная доля приближения. Но следует подчеркнуть, что основные выделенные частные распределения для фракций 2–1 и 10–2 мм осуществляются на основе фракций с равным размерным шагом в 1 мм: 2–1 и 3–2 мм. Ранее В.В. Медведевым размер агрегатов 5–3 мм был отмечен как критический, при котором их физические свойства меняются по сравнению с более мелкими агрегатами [17]. Это хорошо согласуется с тем, что фракция 3–2 мм является переходной (граничной для частных распределений), при которой свойства почвы меняются.

Сравнивая выделенные выше с помощью МГК группы структурных отдельностей с частными распределениями на логнормальной шкале, отражающими структуру данных, видно, что они

очень близки. Единственным отличием является группа частиц <0.25 мм, которая по структуре данных относится к отдельностям <1 мм, а по отклику системы на воздействие стоит отдельно. Как уже упоминалось, это можно объяснить тем, что фракция представлена двумя наборами частиц, отличающихся по свойствам. Первый – это частицы, сформировавшиеся в результате разрушения при обработке, они обладают повышенной адгезионной способностью [21], их большая часть слипается в глыбы >10 мм. Второй набор – это частицы, которые не обладают способностью слипаться в макроагрегаты, вероятно не затронутые обработкой (в нативных почвах структурные отдельности естественного сложения <0.25 мм сохраняют свои размеры после цикла увлажнения–высушивания [30]). Вероятно, поэтому в ГК1 уменьшение, а не увеличение этой фракции отражает пахотное использование черноземов.

Как было показано выше, для деградиционных механизмов в системе характерно накопление глыбистых частиц >10 мм. Физически это выражается в том, что при распашке агрегаты разрушаются, но после цикла увлажнения–иссушения слипаются в крупные >10 мм, то есть глыбистые частицы происходят из агрегатов. Дополнительным доказательством может быть описанная особенность черноземов при распашке накапливать глыбистые частицы, количество которых в ненарушенных почвах незначительно [13–15, 17]. При этом выше показано, что восстановительные механизмы в рассматриваемой системе больше отражены по линии ГК2. В первую очередь восстановление сопровождается накоплением фракции



**Рис. 4.** Средневзвешенные диаметры (СВД) водоустойчивых агрегатов, полученные просеиванием в воде крупных структурных отделеностей разного размера (5–3, 7–5, 10–7 и >10 мм) естественного сложения из черноземов разного вида использования, разбросом показано стандартное отклонение.

крупных агрегатов 10–2 мм. Исходя из размерной близости глыб >10 мм и агрегатов 10–2 мм, можно предложить концептуальную модель восстановления структуры. В связи с тем что, образующиеся после распашки глыбы в основном не водоустойчивы, а восстановление структуры связано с накоплением крупных агрегатов, можно предположить, что приобретение глыбами водоустойчивости и снижение их размеров до уровня 10–3 мм является ключевым механизмом восстановления структуры черноземов. Вероятно, восстановление происходит под воздействием корней растений, гифов грибов и клеящих веществ растительного происхождения, то есть связано с обильным поступлением органического вещества в систему.

С целью подтверждения высказанного предположения исследовано распределение водоустойчивых агрегатов в крупных фракциях естественного сложения (>10, 10–7, 7–5 и 5–3 мм). На рис. 4 приводятся средневзвешенные диаметры водоустойчивых агрегатов (СВД, мм), полученные для этих размерных фракций.

На рис. 4 четко видны отличия между обрабатываемыми и необрабатываемыми почвами. В вариантах необрабатываемых почв: залежь, лесополоса и степь – СВД водоустойчивых агрегатов закономерно увеличивается в соответствии с размерами сухих агрегатов, из которых они были выделены.

Следует отметить, что в почвах описано формирование “ложной водоустойчивости” за счет уплотнения агрегатов, и в связи с этим при увеличении размеров водоустойчивых агрегатов следу-

ет оценивать и их пористость. Однако в данном случае почвы находились без нагрузок и наоборот могли только разуплотняться. Если же уплотнение, вызывающее “ложную водоустойчивость” сохранялось после восстановления, то оно бы проявилось и в черноземах, с которых нагрузку не снимали, например, в варианте бессменный черный пар, из которого вариант залежь был выведен 17 лет назад на момент отбора образцов.

В случае необрабатываемых черноземов, для структурных отделеностей естественного сложения 10–7 мм СВД полученных из них водоустойчивых агрегатов был 6.2–6.8 мм, для естественного сложения агрегатов 7–5 мм – 4.1–5.3 мм, а для 5–3 мм – 2.4–3.4 мм. Таким образом, СВД водоустойчивых агрегатов напрямую зависел от размеров агрегатов естественного сложения взятых для просеивания в воде.

Для обрабатываемых вариантов такой зависимости выявлено не было: СВД водоустойчивых агрегатов, полученных из разноразмерных структурных отделеностей естественного сложения колебались от 0.7 до 2.0 мм.

СВД водоустойчивых агрегатов, полученных для глыбистых частиц >10 мм, в ряду необрабатываемых почв: залежь, лесополоса и степь снижались и составили соответственно 10.5, 9.5 и 2.8 мм. Следует отметить, что уменьшение этого показателя соответствует увеличению времени нахождения почв без обработки: залежь не обрабатывается 17 лет, лесополоса 53 года, степь – несколько сотен лет. Возможно, эта тенденция указывает на проявление механизма восстановления структу-



ры черноземов: глыбистые частицы приобретают водоустойчивость, а их содержание постепенно начинает снижаться.

В пахотных черноземах для этого показателя никаких четко отмечаемых тенденций выявлено не было. При этом вариант пар значимо не отличался от вариантов картофель и контроль к No-till (диапазон значений 1.2–1.9 мм), а вариантах пшеница, кукуруза, севооборот и No-till значения этого показателя изменялось от 3.7 до 6.8 мм.

Таким образом, при восстановлении структуры увеличивается доля крупных водоустойчивых агрегатов, что связано, по-видимому, с приобретением водоустойчивости ранее неводоустойчивых агрегатов естественного сложения. Со временем, вероятно, размеры водоустойчивой фракции >10 мм уменьшаются, и они практически пропадают из гумусового горизонта.

Результаты хорошо согласуются с ранее полученными данными о том, что показатели водоустойчивости структуры, например СВД, или распределение водоустойчивых агрегатов в крупных структурных отдельностях естественного сложения, восстанавливаются в черноземах быстрее, чем распределение структурных отдельностей естественного сложения в целом [22].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом проделанной работы является наглядная демонстрация различий разноразмерных структурных отдельностей гумусового горизонта черноземов. Это дополняет концепцию “Иерархической организации почвенной структуры” [26–29], в рамках которой считают, что макроагрегаты принципиально не отличающимися друг от друга вне зависимости от размеров. Нами показано, что макроагрегаты (в том числе водоустойчивые) неоднородны в своем распределении и по-разному реагируют на вид использования черноземов.

Кратко резюмировать описанный механизм восстановления структуры гумусовых горизонтов черноземов можно следующим образом. При распашке образуются частицы <0.25 мм – осколки агрегатов, они не обладают водоустойчивостью, но могут слипаться в неводоустойчивые макроагрегаты (преимущественно в глыбы >10 мм). В квазиравновесных условиях такие связи существуют достаточно долго. При снятии нагрузки под действием клеящих органических веществ растительного и микробного происхождения, корней и гифов грибов, глыбы приобретают водоустойчивость, немного уменьшаясь в размерах и становятся агрегатами крупных фракций от 10 до 3 мм. Уменьшение размера, вероятно, связано с оптимальностью этих размеров для водоустойчивых агрегатов и особенностью воздействия корней.

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-04-01503.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алгоритмы и программы объективной классификации почв на ЭВМ “МИР-2”. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1976. 172 с.
2. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Овсяня Л.А., Телеснина В.М., Цветкова Ю.Д. Изменение агрегатного состава различных типов почв в ходе залежной сукцессии // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 47–74. doi 10.19047/0136-1694-2017-88-47-74
3. Березин П.Н., Кириченко А.В., Корякина М.А., Коновалов С.Н. Экспериментальное изучение распределений агрегатов, микроагрегатов и гранулометрических элементов почв // Почвоведение. 1991. № 4. С. 135–141.
4. Бергаланфи фон Л. Общая теория систем – обзор проблем и результатов // Системные исследования. Ежегодник. М.: Наука, 1969. С. 30–54.
5. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
6. Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
7. Гублер Е.В. Вычислительные методы анализа и распознавания патологических процессов. Л.: Медицина, 1978, 296 с.
8. Жуков А.В., Андрусевич Е.В., Лапко Е.В., Сиротина В.О. Геостатистическое оценивание агрегатной структуры почвы как композитной переменной // Біологічний вісник. 2015. Т. 5486. С. 101–121.
9. Качинский Н.А. Структура почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963. 100 с.
10. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
11. Когут Б.М., Сысеев С.А., Холодов В.А. Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–562.
12. Колмогоров А.И. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении // Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. С. 264–267.
13. Кузнецова И.В. Изменения физического состояния черноземов типичных и выщелоченных курской области за 40 лет // Почвоведение. 2013. № 4. С. 434–441.
14. 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.
15. Кузнецова И.В., Бондарев А.Г. Проблема деградации физических свойств почв России и пути ее решения // Почвоведение. 1999. № 9. С. 1126–1131.
16. Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А. Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого

- использования на свойства и режимы агрочерноземов Каменной степи // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 83. С. 77–102. doi 10.19047/0136-1694-83-77-102
17. *Медведев В.В.* Механизмы образования макроагрегатов черноземов // Почвоведение. 1994. № 11. С. 24–30.
  18. *Рапопорт А.* Различные подходы к общей теории систем // Системные исследования. Ежегодник. М.: Наука, 1969. С. 55–79.
  19. *Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю.* Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном земледелии // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963.
  20. *Хан Д.В.* Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 140 с.
  21. *Холодов В.А.* Способность почвенных частиц самопроизвольно образовывать макроагрегаты после цикла увлажнения и высушивания // Почвоведение. 2013. № 6. С. 698–706.
  22. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1093–1100.
  23. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
  24. *Aitchison J.* The single principle of compositional data analysis, continuing fallacies, confusions and misunderstandings and some suggested remedies // *CoDa-Work*. 2008. P. 1–28.
  25. *Aitchison J.* The Statistical Analysis of Compositional data // *J. Royal Statistical Soc. Series B. (Methodological)*. 1986. V. 44(2). P. 139–177.
  26. *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 Tillage Res.* 2004. V. 79. P. 7–31.
  27. *Six J., Gregorich E.G., Kogel-Knabner.* Commentary on the impact of Tisdall & Oades (1982) Landmark Papers: № 1. Tisdall J.M. & Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Science*, 33, 141–163 // *Europ. J. Soil Sci.* 2012. V. 63. P. 1–21.
  28. *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.
  29. *Tisdall J.M., Oades J.M.* Organic matter and water-stable aggregates in soils // *J. Soil Sci.* 1982. V. 62. P. 141–163.
  30. *Volikov A.B., Kholodov V.A., Kulikova N.A., Philippova O.I., Ponomarenko S.A., Lasareva E.V., Parfyonova A.M., Hatfield K., Perminova I.V.* Silanized humic substances act as hydrophobic modifiers of soil separates inducing formation of water-stable aggregates in soils // *Catena*. 2016. V. 137. P. 229–236.
  31. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming and creating legends for soil maps. Update 2015. *World Soil Resources Reports 106*. Food and agriculture organization of the United nations. IUSS Working Group WRB. Rome. 2015.

## Changes in the Ratio of Aggregate Fractions in Humus Horizons of Chernozems in Response to the Type of Their Use

V. A. Kholodov<sup>a, b, \*</sup>, N. V. Yaroslavtseva<sup>a</sup>, Yu. R. Farkhodov<sup>a, b</sup>, V. P. Belobrov<sup>a</sup>, S. A. Yudin<sup>a</sup>, A. Ya. Aydiev<sup>c</sup>, V. I. Lazarev<sup>c</sup>, and A. S. Frid<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, per. Pyzhevskii 7, Moscow, 119017 Russia*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, Moscow, 119991 Russia*

<sup>c</sup>*Kursk Research Institute of Agroindustrial Production, pos. Cheremushki 10, Kursk oblast, 305526 Russia*

\*e-mail: vkholod@mail.ru

Data on the aggregate-size distribution (dry sifting method) in humus horizons of chernozems were processed by the principal components analysis (PCA) with the centered logratio transformation of the initial data set. The analysis of the position of particular trials in the space of principal components coupled with the analysis of eigenvector magnitudes made it possible to identify several size fractions of aggregates, whose contents in the soils reflects soil degradation or progradation processes. These groups fitted well to the partial lognormal curves of aggregate sizes. In addition, the distribution of water-stable aggregates in coarse aggregate fractions (>10, 10–7, 7–5, and 5–3 mm) was analyzed. The integral analysis of the obtained data made it possible to propose the following conceptual model of the recovery of the structure of plowed Chernozems. In the course of tillage, soil particles <0.25 mm in size are formed due to comminution. These particles are unstable and may stick together to shape large (>10 mm) water-unstable aggregates (clods). With the removal of tillage loads, large aggregates interact with fresh organic matter, and the water stability of aggregates increases. At the same time, the largest aggregates (mainly >10 mm) tend to transform into aggregates of smaller sizes.

**Keywords:** Haplic Chernozems (Loamic, Pachic), long-term experiments, soil structure, dry and water-stable aggregates, compositional data, principal component analysis, centered logratio transformation