

## АГРОХИМИЯ И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

УДК 631.445.4

### АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО СЛАБОЭРОДИРОВАННОГО В ДЛИТЕЛЬНОМ ОПЫТЕ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2022 г. Э. А. Гаевая<sup>а</sup>, \*, О. С. Безуглова<sup>а</sup>, Е. Н. Нежинская<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральный Ростовский аграрный научный центр,  
ул. Институтская, 1, п. Рассвет, Аксайский район, Ростовская обл., 346735 Россия

\*e-mail: emmaksay@inbox.ru

Поступила в редакцию 10.03.2022 г.

После доработки 19.05.2022 г.

Принята к публикации 30.06.2022 г.

Представлены результаты исследований на экспериментальных полях опыта, заложенного на склоне балки Большой Лог Аксайского района Ростовской области, зарегистрированного в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169). Проанализированы данные об изменении в течение 35-летнего периода содержания органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ), суммы обменных оснований и показателей структурно-агрегатного состава старопахотных земель, расположенных на склоне юго-восточной экспозиции крутизной  $3.5^{\circ}$ – $4.0^{\circ}$ . Почва – чернозем обыкновенный карбонатный тяжелосуглинистый на лёссовидном суглинке (Naplic Chernozem (Loamic)). В результате длительного применения различных технологий возделывания сельскохозяйственных культур на слабо эродированном склоне было отмечено изменение свойств пахотного слоя. Процессы деградации в виде смыва почвы отмечены в 74.2% лет из 35-летнего периода наблюдений в зависимости от складывающихся метеорологических условий. Экстенсивная система земледелия в севооборотах различной эрозионной устойчивости провоцирует уменьшение содержания  $C_{\text{орг}}$  с 3.80–3.83 до 3.58–3.69%. Использование систем земледелия на адаптивно-ландшафтной основе позволило сократить потери почвы. Применение почвозащитных севооборотов на эрозионно-опасном склоне сокращает смыв почвы на 35.0–52.5%. На фоне внесения органических и минеральных удобрений в средних дозах ( $N_{46}P_{24}K_{30}$ ) процессы деградации уменьшаются, формируется бездефицитный баланс гумуса: содержание  $C_{\text{орг}}$  стабилизируется на уровне 3.78–3.88%. Увеличение дозы внесения минеральных удобрений ( $N_{84}P_{30}K_{48}$ ) в 1.5 раза и введение в севооборот 40% многолетних трав приводит к увеличению содержания  $C_{\text{орг}}$  до 4.09–4.12%. Установлена тесная корреляционная зависимость ( $r = 0.90$ ) между суммой обменных оснований и содержанием  $C_{\text{орг}}$  в почве. Увеличение  $C_{\text{орг}}$  и суммы обменных оснований приводит к изменению структуры почвы. Отмечено уменьшение количества глыбистых структурных агрегатов  $>10$  мм за счет увеличения доли агрегатов, относящихся к агрономически ценной размерности 7–2 мм, и пылевой фракции ( $<0.25$  мм). На основе статистического анализа выделены две главные компоненты (ГК), описывающие 79.1% общей дисперсии агрегатов (ГК1 – 40.6%, ГК2 – 38.5%). Увеличение количества мезоагрегатов в ГК1 при уменьшении вклада фракции размером  $>10$  свидетельствует о процессах деградации почвы. При рассеивании в воде наибольший вклад в дисперсию первых двух компонент вносят фракции размером 5–7; 2–3 и 0.25–0.5 мм.

*Ключевые слова:* смыв почвы, органический углерод, обменные основания, структурно-агрегатный состав, средневзвешенный диаметр агрегатов, анализ главных компонент

**DOI:** 10.31857/S0032180X22110053

#### ВВЕДЕНИЕ

Продолжительное возделывание сельскохозяйственных культур на склонах с применением различных систем земледелия сопровождается развитием эрозии и влияет на комплекс почвенных свойств. Существенные изменения происходят в водно-физических и агрохимических свойствах: уменьшаются показатели водостойчивости и водопроницаемости почв, запасов продуктивной влаги, доли агрегатов размером 1–2 мм, содержа-

ния органического углерода, питательных элементов (N, P) и соотношение C/N. Эти изменения связаны с технологическими особенностями обработки почвы и процессами эрозии [10, 16].

Потенциальная опасность эрозии определяется целым рядом факторов, включая топографию, климат, свойства почвы, виды сельскохозяйственных культур и методы их возделывания, характер землепользования и площадь территории. Даже такой фактор как характер поверхности мо-

жет повлиять на интенсивность проявления эрозионных процессов: первоначально ровные, однородные поверхности в меньшей степени подвержены потерям почвы, чем исходно комковатые шероховатые поверхности [48]. И это одна из причин того, что развитие эрозионных процессов на пашне приводит к большей потере частиц диаметром  $<0.25$  мм [18, 22, 45].

В последние годы в связи с потеплением климата проявление эрозионных процессов смещается с весны на зиму, что можно объяснить увеличением зимнего стока, вызванного сдвигом сроков таяния снега в сторону зимы [17, 42]. Учеными из Китайской Республики был проведен анализ эрозии почвы с 1980 по 2019 г. Наибольший прирост показала водная эрозия в полупустынных районах (+7.4%) и ветровая эрозия в засушливых районах (+3.2%). В среднем глобальное потепление усилило эрозию почвы на 2.1% [21, 47, 50].

Многолетнее использование почв как пахотных земель приводит к ухудшению их структурного состояния за счет формирования глыбистой структуры (агрегаты размерностью  $>10$  мм) при уменьшении содержания агрономически ценных агрегатов и снижения коэффициента структурности ( $K_{стр}$ ). Значительно уменьшается и содержание наиболее ценной фракции агрегатов (5–1 мм) как на бессменном парующей почве, так и при бессменном возделывании сельскохозяйственных культур. Сокращается и количество водоустойчивых агрегатов, причем средневзвешенный диаметр (СВД) водоустойчивых агрегатов становится существенно меньше оптимальных значений [13, 23].

Изучение структурного состояния верхнего гумусированного горизонта пашни и почв с нарушенным строением показало, что содержание агрономически ценных агрегатов в биоценозах (луг, залежь, сенокосы) больше, чем на пашне [3, 4]. При распашке агрегаты дробятся на более мелкие отдельные, образуются частицы размером  $<0.25$  мм, которые могут слипаться в водоустойчивые макроагрегаты и глыбы  $>10$  мм. Оставление почвы в залежном состоянии приводит к восстановлению структуры и увеличению количества фракций размерностью от 10 до 3 мм [38].

На существование положительной связи между содержанием микроагрегатов и углерода в гумусовых горизонтах указывалось давно. Наличие такой связи подтверждено на представительном ряде почв, однако начинается она проявляться только при содержании гумуса  $>2-3\%$  [36].

Устойчивость агрегатов уменьшается с уменьшением суммы обменных оснований и содержания органических коллоидов [7, 46, 49]. В почвенном поглощающем комплексе (ППК) за 50–60 лет изменения происходят под влиянием как природного, так и антропогенного воздействия. Форми-

рование ППК идет под воздействием всех экологических факторов в ходе почвообразования и эволюции почв [8]. Убыль обменных оснований в черноземных почвах составляет за полувековой период 13–54% [11, 28]. Распашка лесных почв и возделывание на них сельскохозяйственных культур в течение 15 лет также сопровождается уменьшением суммы обменных оснований и содержания органического вещества [53].

Структура агрочерноземов определяется не только особенностями водного и теплового режимов, но и активным механическим вмешательством, что влияет, во-первых, на скорость агрогенного преобразования структуры, во-вторых, на мощность охваченного преобразованиями слоя. Трансформация структуры в основном ограничивается агрогоризонтом. Наступление равновесия между разрушением и новообразованием структуры во многом зависит от применяемых севооборотов, систем обработки почвы и агротехнологий [19]. Так, введение прямого посева существенно изменяет особенности трансформации органического вещества и биологическую активность в черноземах обыкновенных [37, 39].

На агрофизические показатели чернозема влияют и различные способы основной обработки почвы: вспашка обеспечивает лучшие агрофизические показатели по структуре и плотности сложения; мелкая плоскорезная обработка приводит к ухудшению агрофизических свойств почвы [25].

Регулировать структуру почвы в пахотном слое можно внесением различных органо-минеральных удобрений. Поступление удобрений способствует интенсивному развитию почвенной микрофлоры, которая участвует в том числе и в образовании органического вещества. Органическая система в сравнении с неудобренными посевами увеличивает количество агрономически ценных агрегатов и улучшает структуру почвы. Свежепоступившее органическое вещество почвы участвует в оструктуривании почвенных отдельных, склеивая пылевидные частицы в более крупные агрегаты, которые в меньшей степени подвержены смыву и размыву [9, 24, 27, 30, 43, 51, 55].

Почва – сложный комплекс, в состав которого входят различные минеральные и органические вещества. Гедройц [8] указывал, что максимальная производительность почвы, то есть величина урожая, который почва способна давать, находится в теснейшей зависимости от величины и свойств ППК, а процесс почвообразования состоит, главным образом, в изменении, создании и разрушении поглощающего комплекса почв. Потенциальная катионообменная емкость и насыщение основаниями играют важную роль в механизмах связывания органического углерода [46]. Органическое вещество почвы играет важную роль в об-

менном поглощении катионов в почвах и его плотительная способность намного больше, чем емкость поглощения минералов [45].

Часть черноземов России выпажана в результате интенсивного использования, содержит недостаточное количество гумуса, элементов питания растений, характеризуется низкой степенью оструктуренности. Такие почвы уязвимы для засух и суховея, а также водной и ветровой эрозии (дефляции). Поэтому для сохранения и повышения их плодородия необходимо проводить комплекс агротехнических, агрохимических и мелиоративных мероприятий, направленных на сохранение и накопление влаги с помощью лесонасаждений, снегозадержания и применения различных органических удобрений, минеральных туков [35].

Длительные опыты позволяют исследовать происходящие с почвой изменения под воздействием природных и антропогенных факторов: оценить в динамике влияние удобрений, возделываемых культур, систем обработки почвы, метеорологических условий на агрохимические и агрофизические свойства. Преимуществом таких исследований является возможность проводить наиболее объективную и достоверную оценку потерь и накопления органического вещества при различных агрогенных воздействиях. Однако для установления количественных закономерностей временной динамики органического углерода в стационарных полевых опытах необходимо решение ряда теоретических и методологических проблем [14].

Цель исследования – определить влияние длительного применения различных технологий возделывания сельскохозяйственных культур на слабо эродированном склоне на комплекс агрофизических свойств в пахотном слое чернозема обыкновенного карбонатного.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования проводили в 1986–2021 гг. в длительном стационарном эксперименте на склоне балки Большой Лог Аксайского района Ростовской области. Почвенный покров участка представлен черноземом обыкновенным карбонатным на лёссовидном суглинке (согласно международной классификации WRB – *Na<sub>pl</sub>ic Chernozem (Loamic)* [52]). Мощность  $A_{\text{пах}}$  – 25–30 см,  $A + B$  – от 40 до 60 см – в зависимости от смывости. Плотность почвы в пахотном слое варьирует в пределах 1.10–1.25 г/см<sup>3</sup>. Пористость пахотного слоя – 61.5, подпахотного – 54%. Полевая влагемкость составляет 30–35 вес. %, влажность завядания – 14.5–15.6%.

Склон юго-восточной экспозиции крутизной до 3.5°–4.0°, эрозионные процессы выражены слабо. Слой весеннего стока 10% обеспеченности –

52 мм, среднегодовой сток около 20 мм [6]. Опыт зарегистрирован в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169).

Климат зоны проведения исследований – засушливый, умеренно жаркий, континентальный. Среднее многолетнее количество осадков составляет 492 мм. За весенне-летний период выпадает 260–300 мм. Среднегодовая температура составляет 8.8°C, средняя температура января минус 6.6°C, июля +23°C, минимальная зимой – минус 41°C, максимальная летом – до 40°C. Сумма активных температур 3210°–3400°. Частые явления – суховеи, имеют место пыльные бури различной интенсивности [31].

Факторами опыта являются севообороты и система удобрений. Севообороты развернуты во времени и пространстве в трехкратном повторении в пяти полях (табл. 1). Они построены так, что в одном направлении убывает неустойчивый к эрозии компонент структуры посева (чистый пар) с 20 до 0%, с другой стороны, возрастает эрозионно-устойчивый компонент (многолетние травы) от 0 до 40%.

Применяли 3 уровня питания растений: 0 – естественное плодородие; первый уровень минерального удобрения –  $N_{46}P_{24}K_{30}$ , второй –  $N_{84}P_{30}K_{48}$  на 1 га севооборотной площади. Органические удобрения вносили с первой по пятую ротацию севооборота в чистый пар и под пропашные культуры в дозе 5 и 8 т полуперепревшего навоза крупного рогатого скота.

Использовали основную обработку почвы – отвальную, выполняемую плугом ПН-4-35 под яровые культуры: под горох, сою – на глубину 23–25 см, под ячмень на 20–22 см, под паровое поле и пропашные культуры на глубину 27–30 см.

Количество смывтой почвы определяли по изменению водорезин. Для этого измеряли глубину, ширину и длину водорезин с последующим определением объема смывтой почвы в тоннах с 1 га [12].

Определение структурно-агрегатного состава почвы проведено в образцах с ненарушенной структурой. Образцы отбирали после основной обработки почвы, послойно до глубины 30 см с интервалом в 10 см. Полученные результаты усреднены для пахотного слоя. Выделение агрегатов и определение водоустойчивости структурных отдельностей проведено просеиванием на воздухе и в воде по методу Саввинова [5].

По результатам просеивания на воздухе определяли коэффициент структурности ( $K_{\text{стр}}$ ) по формуле (1):

$$K_{\text{стр}} = \frac{\sum(10-0.25 \text{ мм})}{\sum(>10 \text{ мм}, <0.25 \text{ мм})}, \quad (1)$$

**Таблица 1.** Схема чередования культур в севооборотах

Севооборот А	Севооборот В	Севооборот С
1. Чистый пар	1. Зернобобовые (горох, соя)	1. Пропашные культуры (кукуруза на силос; на зерно)
2. Озимая пшеница	2. Озимая пшеница	2. Озимая пшеница
3. Озимая пшеница	3. Пропашные культуры (кукуруза на силос, подсолнечник)	3. Яровой ячмень
4. Пропашные культуры (кукуруза на силос, подсолнечник)	4. Яровой ячмень	4. Многолетние травы (выводное поле)
5. Яровой ячмень	5. Многолетние травы (выводное поле)	5. Многолетние травы (выводное поле)

где над чертой сумма агрономически ценных агрегатов 10–0.25 мм, под чертой – сумма агрегатов глыбистой и пылевой фракций.

По результатам просеивания в воде определяли коэффициент водоустойчивости ( $K_{\text{вв}}$ ) по формуле (2):

$$K_{\text{вв}} = \frac{\sum(7-0.25 \text{ мм})}{\sum(>7 \text{ мм}, <0.25 \text{ мм})}, \quad (2)$$

где над чертой сумма водостойких агрегатов размером 7–0.25 мм; под чертой сумма агрегатов размером >7, <0.25 мм.

Средневзвешенный диаметр (СВД) агрегатов для просеивания на воздухе и в воде рассчитывали по формуле (3):

$$\text{СВД} = \frac{d_1 p_1 + p_2 d_2 + \dots + p_n d_n}{100}, \quad (3)$$

где,  $d_1, d_2, d_n$  – средний диаметр фракций, мм;  $p_1, p_2, p_n$  – содержание данной фракции, % [33].

Содержание органического вещества в почве ( $C_{\text{орг}}$ ) определяли по методу Тюрина (ГОСТ 26213-91), сумму обменных оснований – по методу Каппена [1].

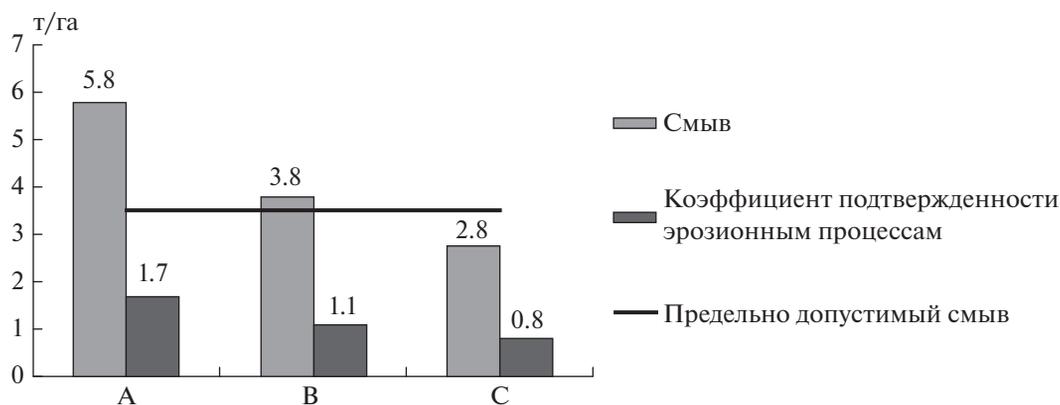
Математическую обработку полученных результатов проводили с использованием Microsoft Excel и программе Statistica 13.3. В таблицах представлены средние значения ( $M$ ) и их стандартные отклонения ( $\pm \text{SEM}$ ).

Для уменьшения размерности данных был использован анализ главных компонент (Principal Component Analysis – PCA) который является одним из широко используемых методов, направленных на изучение закономерностей при обработке многомерных данных. Он считается наиболее эффективным способом понижения размерности данных, позволяющий описывать объекты меньшим числом обобщенных показателей – главными компонентами (ГК). Анализ проведен на основе корреляционной матрицы с использованием программного обеспечения [26].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Смыв почвы.** Длительные опыты позволяют вести наблюдение в динамике за несколькими показателями одновременно. Одним из признаков деградации склоновых земель является смыв почвы. Вместе с водой вниз по склону уносится плодородный слой почвы. В зависимости от складывающихся метеорологических условий смыв почвы наблюдался не каждый год. В период с 1990 по 2020 гг. смыв почвы был отмечен в 74.2% лет. В остальные годы условия периода весеннего снеготаяния и летние ливни процессов эрозии не вызывали. Интенсивность смыва почвы также зависела от складывающихся условий. Наибольшее количество смытой почвы на полях, не имеющих почвозащитного комплекса, составило 18.5 т/га [20]. Предельно допустимые потери почвы для Ростовской области составляют 3.5 т/га в год – это то количество почвы, которое может образоваться в течение года в естественных ценозах [29].

Использование систем земледелия на ландшафтной основе, почвозащитных севооборотов в длительном стационарном опыте позволило сократить эти потери. В изучаемых севооборотах, в зависимости от их конструкции, эрозионные процессы имели разную интенсивность. Для изучения эрозионной устойчивости склонов за контрольный вариант был взят севооборот А, в структуру посевных площадей которого входило поле с 20% чистого пара. Эрозионная устойчивость других севооборотов была сопоставлена с севооборотом А. Наибольшее количество смытой почвы было отмечено в севообороте с 20% чистого пара и составляло 5.8 т/га. Севооборот В с 20% многолетних бобовых трав (люцерна и эспарцет) занимал промежуточное положение. В этом севообороте смыв почвы составлял 3.8 т/га, то есть уменьшение смыва составило 35.5%. По мере увеличения доли многолетних трав до 40% количество смытой почвы уменьшилось более чем в 2 раза: до 2.8 т/га, и соответственно уменьшение смыва достигало 52.5% (севооборот С). Оценить степень развития эрозионных процессов можно по коэф-



**Рис. 1.** Смыв почвы в зависимости от конструкции севооборота (севооборот А, имеющий в структуре посевов 20% чистого пара и 0% многолетних трав; севооборот В – 0% чистого пара и 20% многолетних трав; севооборот С – 0% чистого пара и 40% многолетних трав). Жирной линией отмечен предельно допустимый смыв почвы, составляющий 3.5 т/га в год [30].

фициенту подверженности эрозионным процессам, который рассчитывается как отношение предельно допустимого смыва к фактическому. Из рис. 1 видно, что с увеличением доли многолетних трав до 40% коэффициент подверженности эрозионным процессам уменьшается в 2 раза.

**Влияние агрохимических свойств почвы на структурно-агрегатный состав.** Устойчивость почвы к процессам деградации в ландшафтном земледелии можно оценить по нескольким показателям, в числе которых смыв почвы, потеря гумуса и биогенных элементов. Содержание гумуса в почвах является ключевым показателем их потенциального плодородия и агроэкологической устойчивости [15]. На пахотных почвах потери органического вещества происходят из-за минерализации, отчуждения с сельскохозяйственными культурами и влияния ветровой и водной эрозии [2].

Исследованиями установлено уменьшение содержания  $C_{\text{орг}}$  в зависимости от интенсивности технологии возделывания сельскохозяйственных культур, способа обработки почвы, жидкого и твердого стоков [30, 34, 54]. Баланс  $C_{\text{орг}}$  в почве зависит от соотношения количества образованного и расходуемого  $C_{\text{орг}}$  и может быть дефицитным, бездефицитным и расширенным. Исходное содержание  $C_{\text{орг}}$  в почве при закладке стационарного опыта составляло 3.8–3.83%. Через 10 лет к концу второй ротации в севообороте А, имеющем в структуре посевных площадей 20% чистого пара, на варианте опыта без внесения минеральных удобрений среднестатистическая потеря  $C_{\text{орг}}$  была равна 0.22%. В пересчете на 1 га севооборотной площади потеря почвы из пахотного слоя составила 7.9 т/га. Внесение минеральных и органических удобрений ( $N_{46}P_{24}K_{30} + 5$  т навоза) сократило разницу в содержании  $C_{\text{орг}}$  по сравне-

нию с исходным количеством до 0.04% (1.4 т/га). Увеличение дозы внесения удобрений в полтора раза ( $N_{84}P_{30}K_{48} + 8$  т навоза) позволило сохранить количество  $C_{\text{орг}}$  на исходном уровне. Введение в севооборот В 20% многолетних трав сократило потерю  $C_{\text{орг}}$  на варианте естественного плодородия до 0.12% (4.3 т/га). На первом уровне питания потери  $C_{\text{орг}}$  были незначительные (0.04% или 1.4 т/га), а на втором - получено достоверное увеличение содержания  $C_{\text{орг}}$  по сравнению с исходным (0.04% или 1.4 т/га). Увеличение доли многолетних трав в два раза в структуре посевных площадей в севообороте С на естественном уровне питания растений способствовало сохранению  $C_{\text{орг}}$  на исходном уровне, а при внесении удобрений в различных дозах привело к увеличению гумусированности на 0.05–0.08% (1.8–2.9 т/га) (табл. 2).

К концу седьмой ротации севооборотов тенденции в изменении  $C_{\text{орг}}$  сохранились. В севооборотах различных конструкций на склоне крутизной 3°–3.5° возделывание сельскохозяйственных культур без внесения удобрений привело к потере  $C_{\text{орг}}$  в различных количествах. Наибольшие потери  $C_{\text{орг}}$  были отмечены в севообороте А (0.25% или 8.9 т/га). Наличие в севообороте 20% чистого пара приводит к наибольшим потерям почвы в результате эрозионных процессов. В чистом пару наиболее интенсивно происходят процессы минерализации, следствием которых также является потеря  $C_{\text{орг}}$ . Введение в севооборот 20% многолетних трав сокращает потери  $C_{\text{орг}}$  до 0.17% (6.2 т/га), а увеличение доли многолетних трав до 40% – до 0.11% (3.8 т/га). Внесение удобрений в средних дозах позволяет незначительно сократить потери  $C_{\text{орг}}$  в севообороте А до 0.18%

**Таблица 2.** Динамика содержания  $C_{орг}$  в слое почвы 0–30 см эродированной пашни (0 – начало ротации, II – вторая ротация, VII – седьмая ротация; (среднее  $\pm$  ошибка среднего,  $n = 3$ ))

Уровень питания	Ротация севооборотов			Изменение содержания $C_{орг}$			
				т/га		%	
	0***	II	VII	за 2 ротации	за 7 ротаций	за 2 ротации	за 7 ротаций
Севооборот А – 20% чистого пара и 0% многолетних трав							
0	3.83	3.61 $\pm$ 0.03	3.58 $\pm$ 0.03	–7.9	–8.9	–0.22	–0.25
1		3.79 $\pm$ 0.03	3.65 $\pm$ 0.02*	–1.4	–6.5	–0.04	–0.18
2		3.83 $\pm$ 0.02*	3.95 $\pm$ 0.02**	0.0	4.2	0.00	0.12
Севооборот В – 0% чистого пара и 20% многолетних трав							
0	3.82	3.70 $\pm$ 0.03	3.65 $\pm$ 0.02	–4.3	–6.2	–0.12	–0.17
1		3.78 $\pm$ 0.02	3.78 $\pm$ 0.02*	–1.4	–1.6	–0.04	–0.043
2		3.86 $\pm$ 0.01*	4.09 $\pm$ 0.03**	1.4	9.8	0.04	0.27
Севооборот С – 0% чистого пара и 40% многолетних трав							
0	3.80	3.80 $\pm$ 0.02	3.69 $\pm$ 0.01	0.0	–3.8	0.0	–0.11
1		3.85 $\pm$ 0.02	3.88 $\pm$ 0.02*	1.8	3.0	0.05	0.08
2		3.88 $\pm$ 0.02*	4.12 $\pm$ 0.01**	2.9	11.6	0.08	0.32

\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\* – SEM не определяли.

(6.5 т/га) и существенно уменьшить их в севообороте В 0.043% (1.6 т/га).

В севообороте С внесение удобрений в средних дозах и удвоенное по площади поле многолетних трав позволяют увеличить содержание  $C_{орг}$  (+0.08% или 3.0 т/га).

Внесение органических удобрений в количестве 40 т один раз за ротацию, приводит к расширенному воспроизводству  $C_{орг}$  во всех севооборотах [15]. В севообороте А за 7 ротаций прирост  $C_{орг}$  составил в среднем 0.12% (4.2 т/га), в севообороте В, имеющем в структуре посевных площадей 20% многолетних трав, прирост  $C_{орг}$  увеличился более чем в 2 раза и составил 0.27% (9.8 т/га), а в севообороте С с 40% многолетних трав – почти в 3 раза (0.32%, 11.6 т/га).

В результате проведенного анализа содержания суммы обменных оснований в севооборотах различной эрозионной устойчивости, была выявлена аналогичная динамика, что и в содержании  $C_{орг}$ . Было установлено наличие тесной корреляционной связи  $r = 0.90$  между суммой обменных оснований и  $C_{орг}$ .

Исходное содержание обменных оснований в почве находилось в пределах от 34.4 до 34.6 мг-экв/100 г почвы. Через две ротации севооборотов содержание обменных оснований уменьшилось в севообороте А на 2.6–4.7; в севообороте В на 9.0–10.7; в севообороте С на 3.8–6.4%. Наиболее значимые изменения произошли в вариантах опыта, где удобрения не вносили (табл. 3).

По окончании седьмой ротации количество обменных оснований уменьшилось в севообороте А на 8.9–11.1; в севообороте В на 5.5–13.3; в севообороте С на 4.4–12.2%. В результате внесения органических и минеральных удобрений в повышенных дозах в севооборотах с многолетними травами была сокращена потеря обменных оснований. Стабилизация процессов деградации за счет фитомелиоративного воздействия многолетних трав и органо-минеральных удобрений оказывает благоприятное воздействие на физические и водно-физические свойства почвы.

Компоненты гумуса участвуют в формировании почвенных агрегатов, выполняя для них скрепляющую и стабилизирующую роль, соединяя микроагрегаты в мезо- и макроагрегаты, обеспечивая их водоустойчивость. В то же время агрегатный состав принимает участие в создании свойств и режимов почв, влияет на процессы разложения органических остатков и их гумификацию, регулируя качественный состав гумуса [32].

В результате длительного сельскохозяйственного использования черноземов обыкновенных изменяется их структурное состояние. Исследования агрегатного состава проводили на варианте опыта внесения доз удобрений, рекомендованных в зональной системе ведения сельского хозяйства. Количество фракции  $>10$  мм уменьшилось за 7 ротаций севооборота более чем в 2 раза. Так, к концу второй ротации севооборотов содержание глыбистых агрегатов колебалось в пределах от 20.9 до 21.5%, а к концу седьмой ротации их количество уменьшилось до 7.1–8.3%. Измене-

**Таблица 3.** Динамика обменных оснований в слое 0–30 см эродированной почвы (0 – начало ротации, II – вторая ротация, VII – седьмая ротация, мг-экв/100 г почвы, (среднее ± ошибка среднего,  $n = 3$ ))

Уровень питания	Ротация севооборотов			Изменение			
	0	II	VII	за 2 ротации	за 7 ротаций	за 2 ротации	за 7 ротаций
				мг-экв/100 г		%	
Севооборот А							
0	34.4	32.8 ± 0.22	30.6 ± 0.12**	–1.6	–3.8	–4.7	–11.1
1		33.4 ± 0.85	30.9 ± 0.13**	–1.0	–3.5	–2.9	–10.1
2		33.5 ± 0.76	31.3 ± 0.14	–0.9	–3.1	–2.6	–8.9
Севооборот В							
0	34.6	30.9 ± 0.19	30.0 ± 0.19**	–3.7	–4.6	–10.7	–13.3
1		31.4 ± 0.19	31.3 ± 0.18**	–3.2	–3.3	–9.2	–9.5
2		31.5 ± 0.41	32.7 ± 0.17	–3.1	–1.9	–9.0	–5.5
Севооборот С							
0	34.4	32.2 ± 0.26	30.2 ± 0.14**	–2.2	–4.2	–6.4	–12.2
1		32.6 ± 0.25	32.3 ± 0.16**	–1.8	–2.1	–5.2	–6.1
2		33.1 ± 0.22	32.9 ± 0.13	–1.3	–1.5	–3.8	–4.4

\* SEM не определяли. \*\*  $p > 0.05$ .

ния произошли за счет увеличения вклада агрономически ценных фракций размером 7–10; 5–7; 3–5 и 2–3 мм.

Микроагрегаты 0.02–0.25 мм, скрепленные между собой органическим веществом почвы и корневыми выделениями растений, упакованы в макроагрегаты большего размера, в том числе глыбистые отдельности размером больше 10 мм. При этом крупные макроагрегаты слабоустойчивы при фазовых переходах: при увлажнении такие глыбы разрушаются, а при высушивании вновь образуются. Такие взаимопревращения могут существовать неопределенно долгое время [40]. Длительное возделывание сельскохозяйственных культур приводит к выносу питательных веществ, в том числе и органического вещества почвы. Происходит уменьшение содержания органического вещества почвы, что и приводит к ослаблению межагрегатных связей и разрушению структуры почвы.

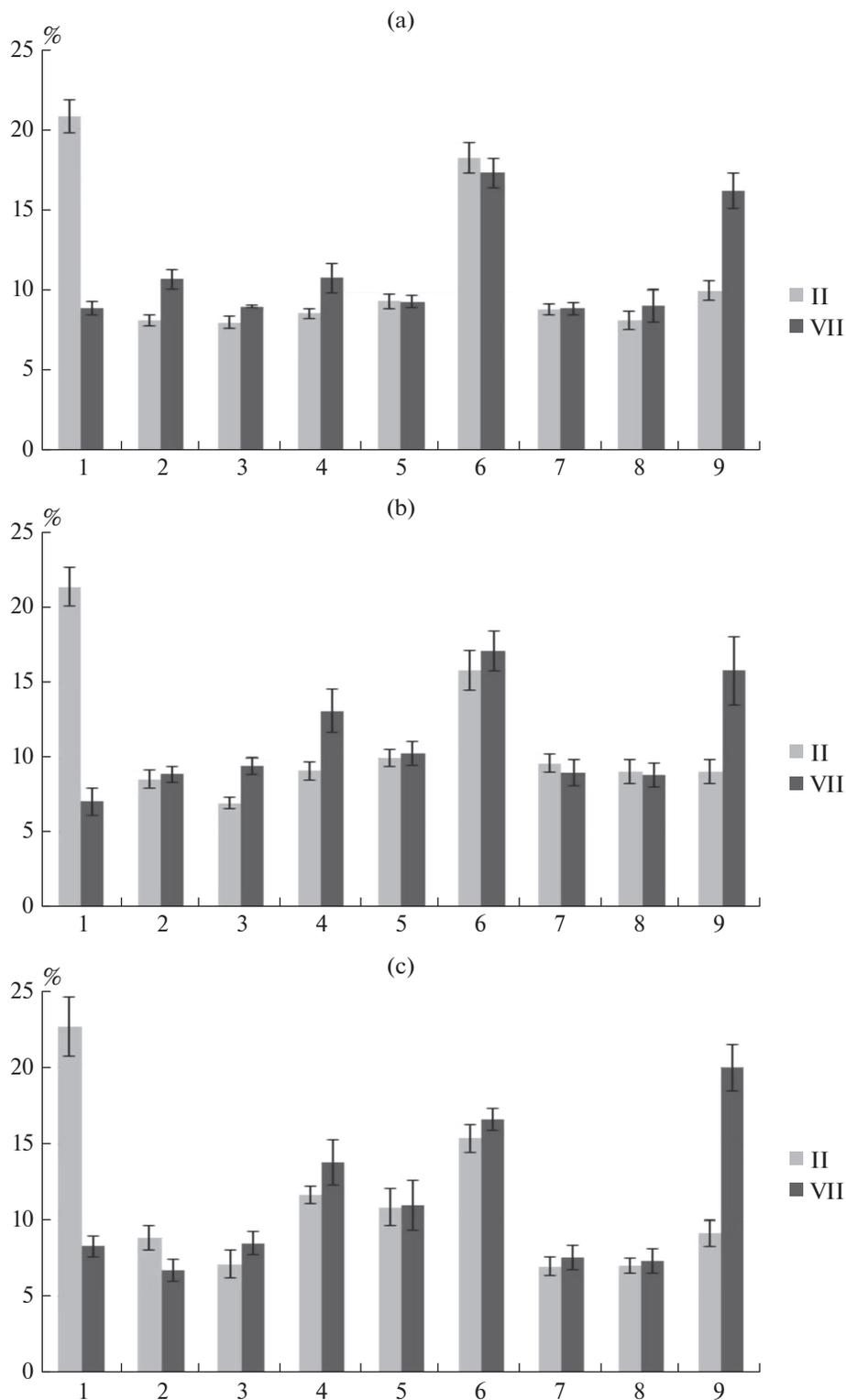
Одновременно наблюдается увеличение доли пылевой фракции (<0.25 мм) с 9.1 до 20.0%. Столь значительные изменения объясняются тем, что на старопахотной почве систематическая механическая обработка почвы сельскохозяйственными орудиями на протяжении длительного времени привела к разрушению агрегатов до пылевидной фракции. Одновременно с физическими процессами в почве наблюдался вынос органического вещества с сельскохозяйственной продукцией, а также отмечены потери с твердым стоком [14, 18]. По данным Семенова с соавт. [32] органическое вещество почвы участвует в образовании мега-, макро- и микроагрегатов, а умень-

шение его приводит к разрушению структуры почвы [33] (рис. 2).

В течение семи ротаций произошло уменьшение количества фракций диаметром >10 мм, соответственно  $K_{стр}$  в чистом пару и под озимой пшеницей по разным предшественникам увеличился с 2.1 до 3.0. При такой тенденции средневзвешенный диаметр агрегатов уменьшился с 4.4–4.7 до 3.2–3.5 мм. В то же время общее количество агрономически ценных агрегатов за 7 ротаций увеличилось с 68.1–69.4 до 71.6–77.0%. По этому показателю агрономическая оценка структурно-агрегатного состава почвы классифицируется как хорошая (табл. 4).

Такая структура почвы позволяет пропускать воду и воздух и обеспечивает корни водой и питательными веществами. Оструктуренная почва в результате более активных биологических процессов обладает большими запасами элементов питания [41]. Севообороты намного эффективнее, чем бессменные посевы в восстановлении крупных макроагрегатов [40, 44].

Наблюдение в течение семи ротаций севооборотов за динамикой водоустойчивых агрегатов выявило аналогичные закономерности, что и при просеивании на воздухе. Отмечена тенденция к уменьшению количества агрономически ценных агрегатов с 71.3–78.7 до 62.3–74.9% и увеличению доли фракции размером <0.25 мм с 17.1–24.9 до 22.3–34.9%. При этих изменениях наблюдалось уменьшение  $K_{вы}$  с 2.5–3.7 до 1.7–3.2, а также СВД с 1.9–2.0 до 1.7–1.9 мм, что существенно ниже показателей оптимума (3–5 мм) [13] (рис. 3, табл. 5).



**Рис. 2.** Динамика структурно-агрегатного состава почвы (просеивание на воздухе) в слое почвы 0–30 см в конце второй (II) и в конце седьмой (VII) ротаций севооборота в чистом пару (а), под озимой пшеницей по предшественнику чистый пар (б); под озимой пшеницей по предшественнику кукуруза (с) (размер фракций, мм: 1 – >10; 2 – 7–10; 3 – 5–7; 4 – 3–5; 5 – 2–3; 6 – 1–2; 7 – 0.5–1; 8 – 0.25–0.5; 9 – <0.25).

**Таблица 4.** Динамика агрономически ценных агрегатов, коэффициента структурности и средневзвешенных диаметров агрегатов в зависимости от предшественника в конце первой (I) и седьмой (VII) ротаций севооборота

Агрофон	Количество агрономически ценных агрегатов, %		$K_{стр}$		СВД, мм	
	I	VII	I	VII	I	VII
Чистый пар	69.2	74.9	2.2	3.0	4.4	3.5
Озимая по пару	69.4	77.0	2.3	3.4	4.5	3.3
Озимая по кукурузе	68.1	71.6	2.1	2.5	4.7	3.2

**Таблица 5.** Динамика агрономически ценных агрегатов, коэффициент водоустойчивости и средневзвешенные диаметры водоустойчивых агрегатов в слое почвы 0–30 см в зависимости от предшественника в конце первой (I) и седьмой (VII) ротаций севооборота

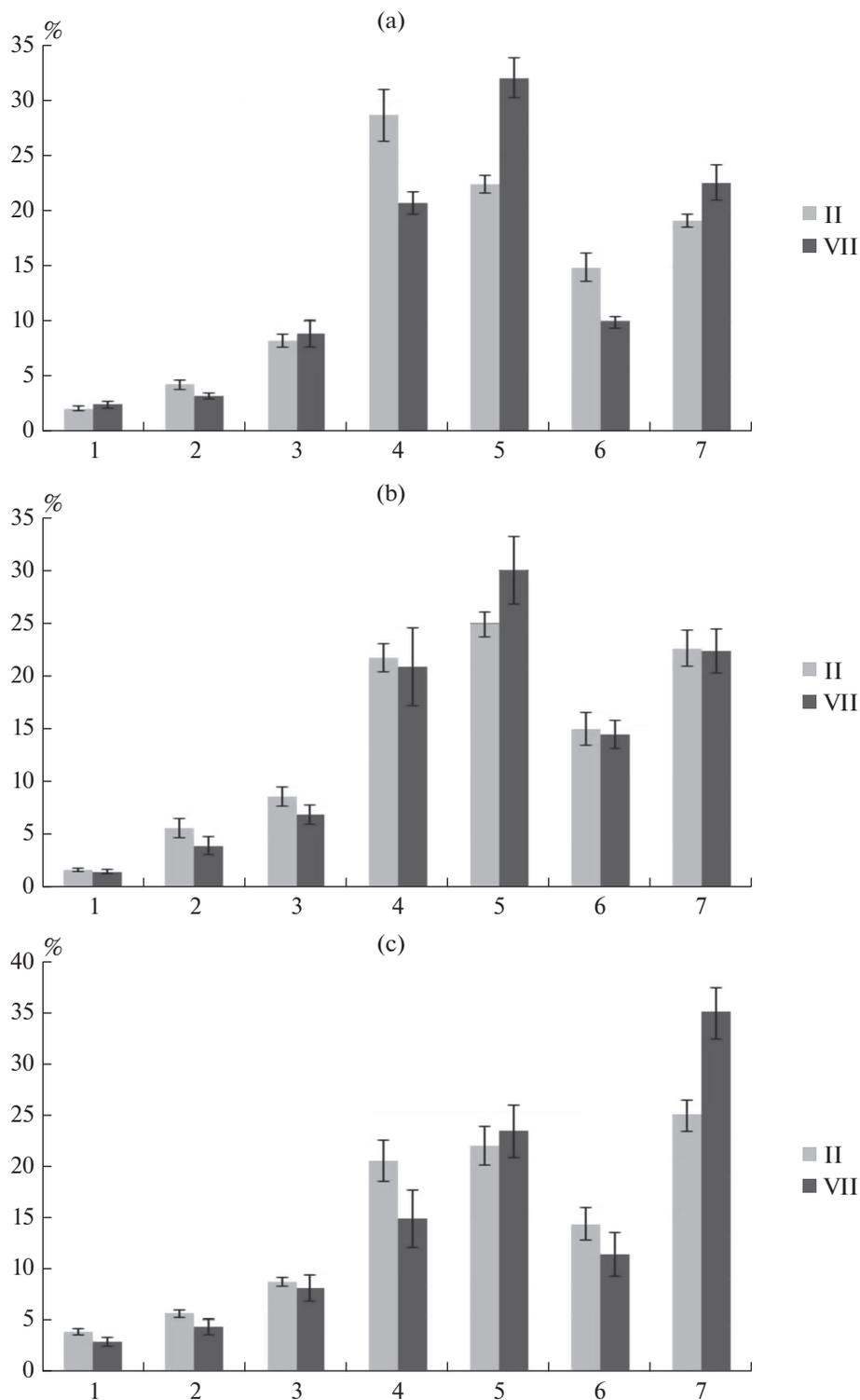
Агрофон	Количество агрономически ценных водоустойчивых агрегатов, %		$K_{ву}$		СВД, мм	
	I	VII	I	VII	I	VII
Чистый пар	78.7	74.9	3.7	3.0	2.0	1.9
Озимая по пару	75.7	76.2	3.1	3.2	1.9	1.7
Озимая по кукурузе	71.3	62.3	2.5	1.7	2.0	1.7

Вместе с уменьшением количества агрономически ценных агрегатов сократилось и количество крупно-глыбистой фракции >7 мм. Если водоустойчивые агрегаты под действием воды разрушаются частично, то неводоустойчивая структура распадается на микроагрегаты. Как следствие, при высыхании на поверхности почвы образуется корка, затрудняющая воздухообмен и снабжение корневых систем воздухом. В Аксайском районе Ростовской области возникновение пыльных бурь наблюдается крайне редко, однако при их проявлении пылевая фракция выдувается с поверхности почвы. Наиболее часто на склоне отмечаются процессы эрозии, вызванные стоком поверхностных вод в результате интенсивного снеготаяния или обильных ливней. Органическое вещество почвы в виде коллоидных растворов способно цементировать частицы почвы друг с другом в водоустойчивые агрегаты. Уменьшение содержания органического вещества почвы приводит к снижению противозерозионной стойкости почв агрегатов [37].

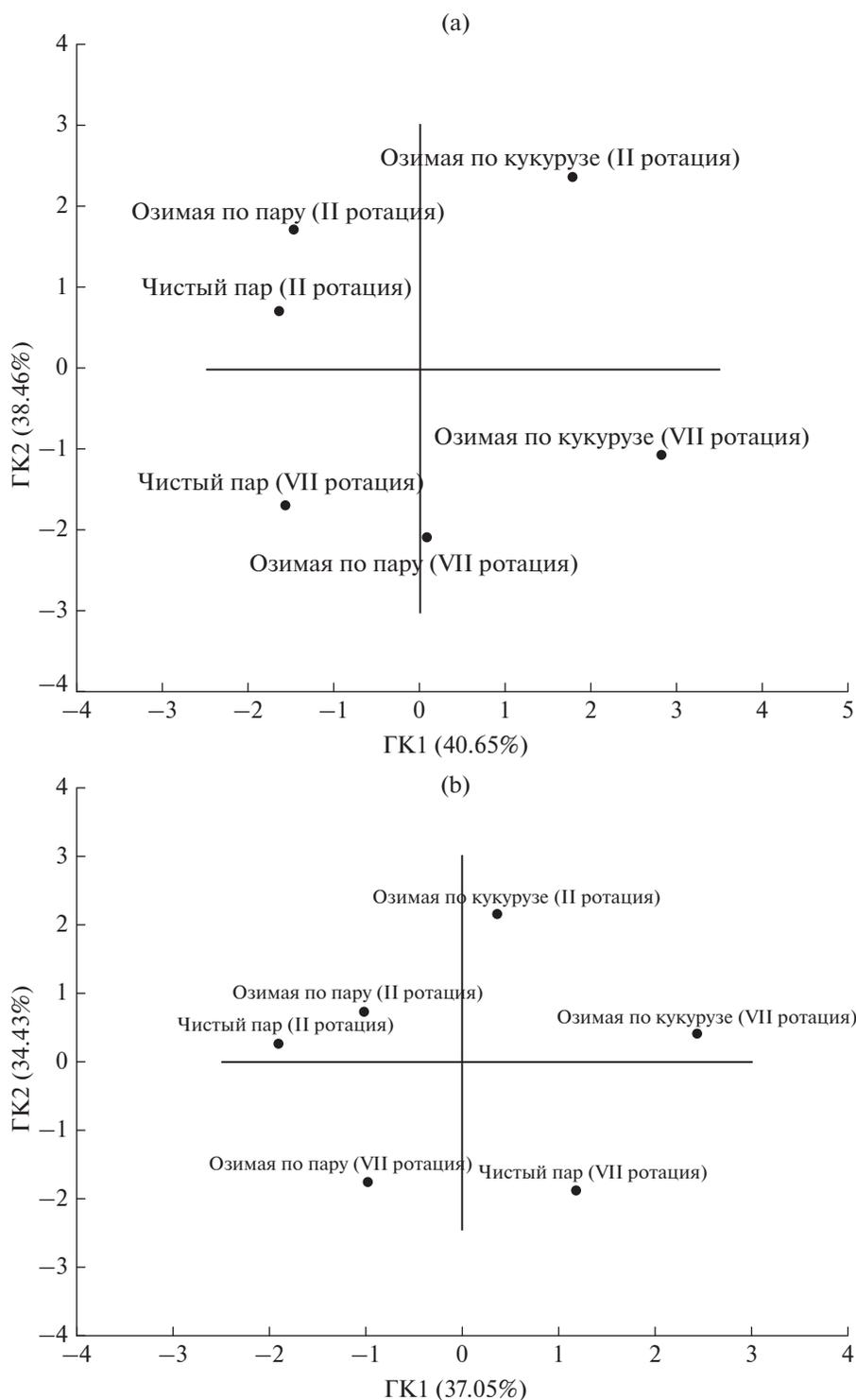
Холодов и Ярославцева [40] выявили общие взаимосвязи между содержанием органического вещества и структурой почвы. Потеря органического углерода почвой обычно связана с процессами деградации ее структуры при интенсивной обработке, а с уменьшением количества агрономически ценных агрегатов снижается их водоустойчивость. Отсюда можно сделать вывод, что

разрушенные агрегаты, высыхая после увлажнения, образуют глыбистые отдельности, отличающиеся от более мелких агрегатов своими свойствами. В связи с тем, что образующиеся после распашки глыбы в основном не водоустойчивы, а восстановление структуры связано с накоплением крупных агрегатов, можно предположить, что ключевым механизмом восстановления структуры черноземов является уменьшение их размеров и приобретение макроагрегатами водоустойчивости. Собственно, сначала должна полностью восстановиться водоустойчивость, чтобы после этого восстановилась структура агрегатов [40].

Большое количество показателей затрудняет проведение всесторонней оценки результатов исследования, поэтому для понижения размерности данных, поиска неявных взаимосвязей и выявления наблюдений, вносящих наибольший вклад в различия между объектами, а также классификации переменных был использован анализ главных компонент. Этот анализ считается наиболее эффективным способом уменьшения количества данных, полученных методом просеивания на воздухе и в воде, позволяющим описывать объекты с меньшим числом обобщенных показателей — главными компонентами. На рис. 4а представлено расположение различных агрофонов в системе координат ГК на основе сухого просеивания. Первые две ГК описывают 79.1% от общей дисперсии, при этом на ГК1 приходится



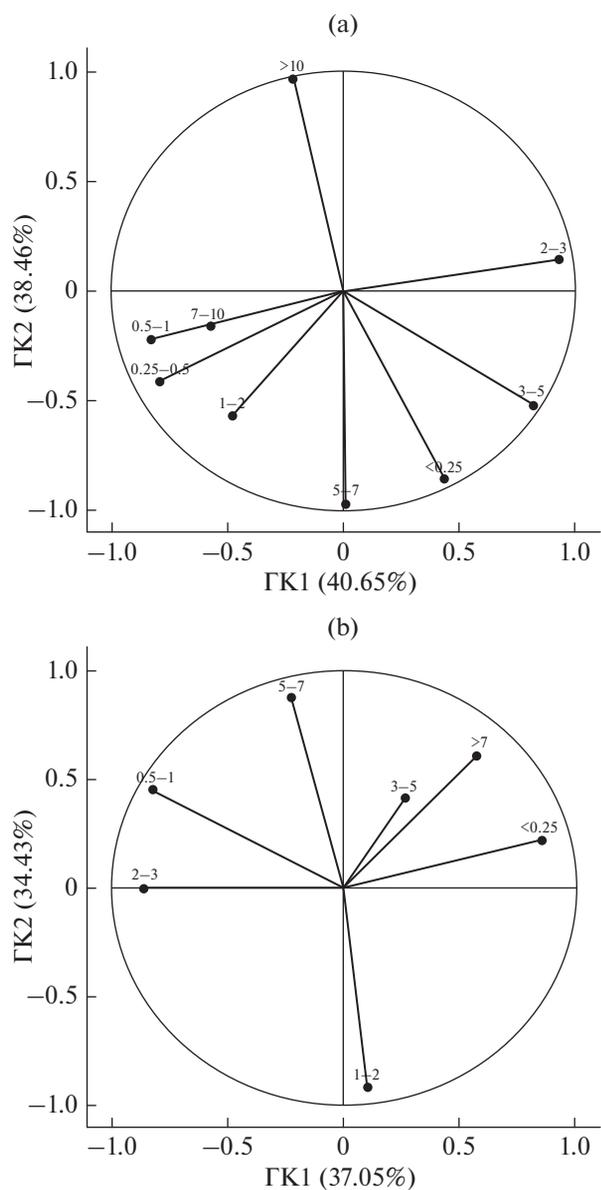
**Рис. 3.** Динамика содержания водоустойчивых агрегатов (просеивание в воде) в конце второй (II) и в конце седьмой (VII) ротаций севооборота в чистом пару (а), под озимой пшеницей по предшественнику чистый пар (б); под озимой пшеницей по предшественнику кукуруза (с) в слое почвы 0–30 см (размер фракции, мм: 1 – >7; 2 – 5–7; 3 – 3–5; 4 – 2–3; 5 – 1–2; 6 – 1–0.25; 7 – <0.25).



**Рис. 4.** Расположение в пространстве первых двух главных компонент различных агрофитотипов после II и после VII ротаций севооборота по результатам просеивания на воздухе (а) и в воде (б).

40.6%, на ГК2 – 38.5%, остальную дисперсию описывают оставшиеся ГК. По ГК1 были выделены 2 крайних варианта - чистый пар и озимая пшеница по кукурузе в оба срока наблюдения. По ГК2 крайними вариантами являются озимая

пшеница по кукурузе (вторая ротация) и озимая пшеница по пару (седьмая ротация). Координаты факторов по ГК1 для чистого пара и озимой пшеницы по предшественнику чистый пар находятся в зоне отрицательных значений, а для ГК2 имеют



**Рис. 5.** Факторные нагрузки на основе корреляции в пространстве первых двух главных компонент для структурных отделностей по результатам просеивания на воздухе (а) и в воде (б).

положительные значения по прошествии первой ротации. Эти два агрофона можно охарактеризовать как почвы, подверженные незначительным изменениям в их структурно-агрегатном составе. Координаты факторов первых двух компонент озимой пшеницы по кукурузе на зерно лежат в области положительных значений, что говорит о ее хорошей структурности.

По истечению седьмой ротации севооборота значения координат для паровых предшественников переместились в отрицательную область, как по GK1, так и по GK2, что свидетельствует об

ухудшении структуры почвы, обусловленном уменьшением количества органического углерода и обменных оснований в севообороте А. Почва под озимой пшеницей по кукурузе за 7 ротаций ухудшила свою структуру только по GK2, переместившись в отрицательную область.

Водоустойчивость почвы характеризует ее эрозионную устойчивость. Из рис. 4в видно, что первые две ГК описывают 71.5% всей дисперсии и распределяются в равных долях между GK1 (37.05%) и GK2 (34.43%) при оценке водоустойчивых агрегатов. Для чистого пара и озимой пшеницы по пару распределение значений координат в системе ГК значительно не изменилось. Однако озимая пшеница по кукурузе находится в области положительных значений за 35-летний период наблюдения, что свидетельствует о хорошей водоустойчивости агрегатов. Поле озимой пшеницы по кукурузе размещается в севообороте С, имеющем в своей структуре многолетние травы, которые препятствуют смыву и размыву почвы. Можно предположить, что сокращение смыва почвы, потери органического углерода и поглощенных оснований способствует улучшению водоустойчивости почвы.

На рис. 5 представлены круги корреляции для GK1 и GK2 с их собственными значениями. Видно, что чем ближе точка, представляющая переменную, к единичной окружности, тем сильнее корреляция переменной с фактором.

На основе факторных нагрузок был определен максимальный вклад в GK1 структурных отделностей при рассеивании на воздухе агрегатов размером 2–3 и 3–5 мм, факторные координаты которых составляют 0.93 и 0.81, а также микроагрегаты от 0.25 до 1 мм (0.80 и 0.83). Во вторую ГК наибольший вклад в дисперсию вносят крупно-глыбистые фракции размером >10 (0.97); 5–7 (–0.97) и пылевидные <0.25 (–0.85). По-видимому, при ежегодной обработке почвы отмечается разрушение макроагрегатов до мезоагрегатов, о чем свидетельствует уменьшение вклада фракции размером >10 в GK1. Процессы деградации характеризует GK2, в которую максимальный вклад вносят макро- и микроагрегаты (рис. 5а).

При рассеивании почвы в воде были выявлены значительные корреляции факторных нагрузок с GK1 для водоустойчивых агрегатов 2–3 мм (–0.86) и 0.5–1 мм (–0.82); <0.25 (0.85). Для GK2 наибольшие значения имела фракция 5–7 (0.88) и 1–2 мм (–0.91). Из приведенных данных можно оценить вклад агрегатов в распределение различных агрофонов в пространстве ГК. Наибольший вклад в дисперсию первых двух факторов вносят фракции размером 5–7; 2–3 и 0.25–0.5 мм как при сухом, так и при мокром рассеивании. Обращает на себя внимание тот факт, что большая часть структурных отделностей по GK2 находится в области от-

рицательных значений, а водоустойчивые агрегаты по этой же компоненте расположены в положительной области. Это подтверждает сделанное ранее предположение, что сначала восстанавливается структура водоустойчивых агрегатов, а затем формируются структурные отдельности сухих агрегатов (рис. 5в).

Можно предположить, что многолетнее использование земель сельскохозяйственного назначения приводит к разрушению почвенных отдельностей на более мелкие фракции, что подтверждается литературными данными [38, 40].

## ВЫВОДЫ

1. Длительное применение различных технологий возделывания сельскохозяйственных культур на слабо эродированном склоне юго-восточной экспозиции крутизной до  $3.5^{\circ}$ – $4.0^{\circ}$  изменило свойства пахотного слоя чернозема обыкновенного карбонатного. Одним из признаков деградации склоновых земель являются эрозионные процессы. В течение 35-летнего периода наблюдений в зависимости от складывающихся метеорологических условий смыв почвы был отмечен в 74.2% лет. Использование систем земледелия на ландшафтной основе в длительном стационарном опыте позволило сократить эти потери. Применение почвозащитных севооборотов с 20% многолетних трав в структуре посевных площадей в условиях эрозионно-опасного склона сокращает интенсивность эрозионных процессов на 35.0%. Увеличение доли многолетних трав до 40% уменьшает смыв почвы до безопасных пределов (на 52.5%).

2. За 30-летний период наблюдения за динамикой  $C_{орг}$  в почве в севооборотах различной эрозионной устойчивости и с экстенсивной системой возделывания культур (без внесения органических и минеральных удобрений) отмечено уменьшение этого показателя на 0.11–0.25%. В результате сокращения процессов деградации и внесения органо-минеральных удобрений в средних дозах ( $N_{46}P_{24}K_{30} + 5$  т навоза) получено бездефицитное воспроизводство плодородия почвы в севооборотах с различной долей многолетних трав в структуре посевных площадей. Увеличение в севообороте с 40% многолетних трав дозы внесения удобрений в 1.5 раза ( $N_{84}P_{30}K_{48} + 8$  т навоза) приводит к расширенному воспроизводству плодородия и увеличению содержания  $C_{орг}$  до 4.09–4.12%.

3. Установлена тесная корреляционная зависимость ( $r = 0.90$ ) между суммой обменных оснований и количеством  $C_{орг}$ . За длительный период наблюдения в севооборотах различной эрозионной устойчивости количество обменных оснований уменьшилось (в процентах от исходного со-

стояния) в севообороте А на 8.9–11.1; в севообороте В на 5.5–13.3; в севообороте С на 4.4–12.2.

4. Количественные изменения в гумусном состоянии почвы приводят к изменению структурного состава. Содержание глыбистых агрегатов уменьшилось с 20.9–21.5 до 7.1–8.3% преимущественно за счет увеличения доли пылеватой фракции: с 9.1 до 20.0%. Было отмечено увеличение количества агрономически ценных агрегатов при сухом и мокром просеивании и  $K_{стр}$  при одновременном уменьшении средневзвешенного диаметра водоустойчивых агрегатов.

5. На основе анализа главных компонент выделены две ГК, описывающие 79.1% общей дисперсии агрегатов (ГК1 – 40.6%, ГК2 – 38.5%). Увеличение количества мезоагрегатов в ГК1 при уменьшении вклада фракции размером  $>10$  свидетельствует о процессах деградации почвы. При рассеивании в воде наибольший вклад в дисперсию первых двух компонент вносят фракции размером 5–7; 2–3 и 0.25–0.5 мм.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по государственному заданию НИОКР № 0026–2019–0002 при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
2. Баламирзоев М.А., Асгерова Д.Б., Мирзоев Э.Р., Магомедов И.А. Биосферно-экологическая оценка плодородия почв дельтово-аккумулятивных равнин западного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 1(58). С. 33–38.
3. Безуглова О.С., Лыхман В.А., Полиенко Е.А., Горюцов А.В. Гуминовые препараты и структурное состояние черноземных и каштановых почв Ростовской области. Азов: Изд-во ООО “АзовПринт”, 2020. 188 с.
4. Бойцова Л.В. Структурный состав дерново-подзолистых почв различного землепользования // Агрофизика. 2017. № 1. С. 10–19.
5. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высш. шк., 1986. 416 с.
6. Василенко В.Н., Зинченко В.Н., Ермоленко В.П., Лабунцев А.В., Шапошникова И.М., Листопадов И.Н., Артохин К.С., Шевченко П.Д., Грабовец А.И. Зональные системы земледелия на ландшафтной основе. п. Рассвет, ГНУ ДЗНИИСХ. 2007. 243 с.
7. Воробьев В.Б., Грищенко И.Ю. Влияние гумусированности агродерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на некоторые свойства почвенно-

- поглощающего комплекса // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 3. С. 59–62.
8. *Гедройц К.К.* Учение о поглотительной способности почв Избр. соч. М.: Сельхозгиз, 1955. Т. 1. С. 241–384.
  9. *Герасименко В.Н., Гладков В.Н., Анищенко А.А.* Изменение структуры чернозема выщелоченного в низинно-западинном агроландшафте в зависимости от технологии возделывания полевых культур // Политематический сетевой электронный научный журн. Кубанского государственного аграрного ун-та. 2018. № 139. С. 38–47. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-138-014>
  10. *Гусаров А.В., Голосов В.Н., Шарифуллин А.Г., Гафуров А.М.* Современный тренд эрозии пахотных черноземов южных на западе Оренбургской области // Почвоведение. 2018. № 5. С. 601–616. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18120043>
  11. *Джанаев З.Г.* Негативные изменения в поглощающем комплексе почв Северного Кавказа // Плодородие. 2006. № 4(31). С. 7–10.
  12. *Дьяков В.Н.* Совершенствование метода учета смыва почв по водоройнам // Почвоведение. 1984. № 3. С. 136–148.
  13. *Еремина Д.В., Груздева Н.А., Еремин Д.И.* Сравнительная оценка структурно-агрегатного состава темно-серых лесных почв лесостепной зоны Зауралья // Вестник КрасГАУ. 2019. № 12(153). С. 57–63. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2019-12-57-63>
  14. *Козут Б.М., Фрид А.С., Масютенко Н.П., Куваева Ю.В., Романенков В.А., Лазарев В.И., Холодов В.А.* Динамика содержания органического углерода в типичном черноземе в условиях длительного полевого опыта // Агрохимия. 2011. № 12. С. 37–44.
  15. *Козлов А.В., Урмова И.П.* Оценка агроэкологического состояния чернозема оподзоленного в условиях агроэкосистемы юга Нижегородской области // Успехи современного естествознания. 2018. № 12(1). С. 63–69.
  16. *Комиссаров М.А., Клик А.* Влияние нулевой, минимальной и классической обработок на эрозию и свойства почв в нижней Австрии // Почвоведение. 2020. № 4. С. 473–482. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040073>
  17. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Горбеев А.В., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Максимова И.А., Судницын И.И.* Экспериментальное исследование факторов, влияющих на эродированность почв // Почвоведение. 2018. № 3. С. 347–356. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030097>
  18. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Максимова И.А.* Разрушение почвенных агрегатов в склоновых потоках // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1263–1269.
  19. *Лебедева И.И., Чевердин Ю.И., Титова Т.В., Гребенников А.М., Маркина Л.Г.* Структурное состояние миграционно-мицелярных (типичных) агрочерноземов Каменной степи в условиях разновозрастной пашни // Почвоведение. 2017. № 2. С. 227–238. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020095>
  20. *Листопадов И.Н., Гаева Э.А., Игнатьев Д.С., Мищенко А.Е.* Водный режим под озимой пшеницей в севооборотах на эрозионно-опасном склоне // Земледелие. 2012. № 1. С. 6–8.
  21. *Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г.* География динамики земледельческой эрозии почв на европейской территории России // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1390–1400. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17110089>
  22. *Мальцев К.А., Ермолаев О.П.* Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях европейской части России // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1502–1512. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120104>
  23. *Мамонтов В.Г., Байбеков Р.Ф., Лазарев В.И., Юдин С.А., Цветков С.А., Таллер Е.Б.* Изменение структурного состояния чернозема типичного курской области под влиянием бессменных пара и озимой пшеницы // Земледелие. 2019. № 1. С. 7–10. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10102>
  24. *Мамонтов В.Г., Родионова Л.П., Артемьева З.С., Крылов В.А., Клышбекова Г.К.* Агрогенная и постагрогенная трансформация структурного состояния чернозема типичного Курской области // Международный сельскохозяйственный журн. 2019. № 5. С. 35–39. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-15081>
  25. *Медведев И.Ф., Назаров В.А., Губарев Д.И., Жолинский Н.М., Деревягин С.С.* Изменение агрофизических и агрохимических свойств чернозема южного при различных способах основной обработки почвы // Аграрный научный журн. 2017. № 2. С. 14–19.
  26. *Мещалкина Ю.Л., Самсонова В.П.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 84 с.
  27. *Найденов А.С., Василько В.П., Бардак Н.И., Гладков В.Н.* Динамика агрофизических свойств черноземных почв при длительном сельскохозяйственном использовании и пути их оптимизации в условиях Краснодарского края // Политематический сетевой электронный научный журн. Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 142. С. 41–56.
  28. *Подколзин А.И., Шкабарда С.Н.* Состояние и динамика изменения поглощающего комплекса почв центрального Предкавказья // Агрохимия. 2008. № 1. С. 16–25.
  29. *Полуэктов Е.В.* Эрозия почв на Дону и меры борьбы с ней. Ростов-на-Дону: Донской зональный НИИ сельского хозяйства, 1984. 160 с.
  30. *Романенко А.А., Кильдюшкин В.М., Кулик В.А., Солдатенко А.Г., Животовская Е.Г.* Плодородие чернозема выщелоченного деградированного и продуктивность озимой пшеницы в севообороте при различных способах обработки и системах удобрения // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 2. С. 8–10.
  31. *Селянинов Г.Т.* Методика сельскохозяйственной характеристики климата. Мировой агроклиматический справочник. Л., 1977. 220 с.
  32. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б., Хромычкина Д.П., Ковалев И.В., Ковалева Н.О.* Взаимосвязь размера агрегатов, содержания дисперсного органического вещества и разложения растительных остатков в почве // Почвоведение. 2020. № 4. С. 430–443. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040139>

33. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К., 2007. 616 с.
34. *Терпелец В.И., Плитинь Ю.С.* Гумусное состояние чернозема выщелоченного в агроценозах Азово-Кубанской низменности. Краснодар: КубГАУ, 2015. 127 с.
35. *Тюлин В.А., Сулягин В.П.* Конструирование севооборотов в адаптивно-экологическом земледелии (научный обзор) // Международный журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 10–2. С. 297–301.
36. *Филиппова О.И., Холодов В.А., Сафронова Н.А., Юдина А.В., Куликова Н.А.* Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов зонального ряда почв европейской России // Почвоведение. 2019. № 3. С. 335–347. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19030031>
37. *Холодов В.А., Белобров В.П., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р., Дридригер В.К., Ильин Б.С., Лазарев В.И.* Влияние технологии прямого посева на распределение органического углерода и азота во фракциях агрегатов черноземов типичных, обыкновенных и южных // Почвоведение. 2021. № 2. С. 240–246. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21020076>
38. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях земледельческого использования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060>
39. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Яшин М.А., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Филиппова О.И., Воликов А.Б., Иванов А.Л.* Оптические характеристики экстрагируемых фракций органического вещества типичных черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. 2020. № 6. С. 691–702. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20060052>
40. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В.* Агрегаты и органическое вещество почв восстанавливающихся ценозов. М.: ГЕОС, 2021. 120 с.
41. *Ширяева Н.В., Кузнецова Л.Н., Ступаков А.Г., Ширяев А.В., Симашева А.О., Хакимова К.К.* Структурное состояние почвы при возделывании озимой пшеницы по разным предшественникам // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2018. № 3(19). С. 116–123.
42. *Aygun O., Kinnard C., Campeau S.* Responses of soil erosion to warming and wetting in a cold Canadian agricultural catchment // Catena. 2021. V. 201. P. 105184. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105184>
43. *Favaretto N., Cherobim V.F., Medeiros Silveira F., Timofiecsyk A., Skalitz R., Barth G., Pauletti V., Dieckow J., Vezzani F.M.* Can application of liquid dairy manure onto no-tillage oxisols reduce runoff, sediment, phosphorus, and nitrogen losses over 9 years of natural rainfall? // Geoderma. 2022. V. 405. P. 115406. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115406>
44. *Hok L., Moraes Sa J.C., Boulakia S., Reyes M., Oliveira Ferreira A., Tivet F.E., Saab S., Auccaise R., Inagaki T.M., Schimiguel R., Ferreira L.A., Briedis C., Canalli L.B.S., Kong R., Leng V.* Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon based on diversity and high biomass-C input under conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia // Catena. 2021. V. 198. P. 105065. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105065>
45. *Hou T., Filley T.R., Tong Y., Abban B., Singh S., Papanicolaou A.N.T., Wacha K.M., Wilson C.G., Chaubey I.* Tillage-induced surface soil roughness controls the chemistry and physics of eroded particles at early erosion stage // Soil Tillage Res. 2021. V. 207. P. 104807. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104807>
46. *Juhos K., Madarasz B., Kotroczó Z., Beni A., Makadi M., Fekete I.* Carbon sequestration of forest soils is reflected by changes in physicochemical soil indicators – A comprehensive discussion of a long-term experiment on a detritus manipulation // Geoderma. 2021. V. 385. P. 114918. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114918>
47. *Ma X., Zhao C., Zhu J.* Aggravated risk of soil erosion with global warming – A global meta-analysis // Catena. 2021. V. 200. P. 105129. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105129>
48. *Romkens M.J.M., Helming K., Prasad S.N.* Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes // Catena. 2002. V. 46. № 2–3. P. 103–123. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00161-8)
49. *Takoutsing B., Weber J., Aynekulu E., Martín J.A.R., Shepherd K., Sila A., Tchoundjeu Z., Diby L.* Assessment of soil health indicators for sustainable production of maize in smallholder farming systems in the highlands of Cameroon // Geoderma. 2016. V. 276. P. 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.027>
50. *Wang D., Yuan Z., Cai Y., Jing D., Liu F., Tang Y., Song N., Li Y., Zhao C., Fu X.* Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions: A review // J. Environmental Management. 2021. V. 285. P. 112165. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112165>
51. *Wang H., Xu J., Liu X., Zhang D., Li L., Li W., Sheng L.* Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China // Soil Tillage Res. 2019. V. 195. P. 104382. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104382>
52. World reference base for soil resources 2014. II international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
53. *Yimer F., Ledin S., Abdelkadir A.* Concentrations of exchangeable bases and cation exchange capacity in soils of cropland, grazing and forest in the Bale Mountains, Ethiopia // Forest Ecology and Management. 2008. V. 256(6). P. 1298–1302. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.047>
54. *Yuan Z., Jin X., Guan Q., Meshack A.O.* Converting cropland to plantation decreases soil organic carbon stock and liable fractions in the fertile alluvial plain of eastern China // Geoderma Regional. 2021. V. 24. e00356. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00356>
55. *Zhang Y., Shengzhe E., Wang Y., Su S., Bai L., Wu C., Zeng X.* Long-term manure application enhances the stability of aggregates and aggregate-associated carbon by regulating soil physicochemical characteristics // Catena. 2021. V. 203. P. 105342. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105342>

## Agrophysical Properties of Ordinary Slightly Eroded Chernozem in a Long-Term Experiment in the Rostov Region

E. A. Gaevaya<sup>1, \*</sup>, O. S. Bezuglova<sup>1</sup>, and E. N. Nezhinskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal Rostov Agricultural Research Center, Rassvet village, Aksai district, Rostov region, 346735 Russia

\*e-mail: emmaksay@inbox.ru

The article presents the results of research on the fields of an experiment registered in the Russian Geographic Network of long-term experiments with fertilizers (certificate No. 169). Data for a 35-year period of organic carbon content (Corg), the absorbed bases amount, and indicators of the structural and aggregate composition of old arable lands located on a slightly eroded slope with a steepness of 3.5°–4.0° are analyzed. The studied soil was an ordinary carbonate heavy loamy chernozem on loess-like loam (Haplic Chernozem (Loamic)). As a result of the long-term use of various technologies for crops cultivating on a slightly eroded slope, a change in the properties of the arable layer was noted. adation processes in the form of soil washout were observed in 74.2% of years, depending on the prevailing meteorological conditions. The extensive farming system in crop rotations of various erosion resistance is accompanied by a decrease in the Corg content from 3.80–3.83 to 3.58–3.69%. The use of landscape-based farming systems has reduced soil loss. The use of soil-protective crop rotations on an erosion-prone slope reduces soil erosion by 35.0–52.5%. When organomineral fertilizers are applied in medium doses, the degradation processes stop, and a deficit-free humus balance is formed: the Corg content stabilizes at a level of 3.78–3.88%. An increase in the dose of fertilizer application by 1.5 times and the introduction of 40% of perennial grasses into the crop rotation leads to an expanded reproduction of fertility: Corg increases to 4.09–4.12%. A close correlation ( $r = 0.90$ ) between the sum of absorbed bases and the Corg content in the soil was established. Changes in the agrochemical properties of the soil lead to a change of its structural composition. There was a decrease in the number of lumpy structural aggregates >10 mm due to an increase in the proportion of aggregates of agronomically valuable dimensions (7–2 mm) and dusty fraction (<0.25 mm). Principal component analysis (PCA) was used to comprehensively evaluate the results of the study and reduce the data dimensionality, as a result of which the principal components that describe the largest percentage of the structural unit's dispersion were identified.

*Keywords:* Haplic Chernozem (Loamic), soil erosion, organic carbon, absorbed bases, structural and aggregate composition, weighted average diameter of aggregates, principal components analysis