

ВЛИЯНИЕ КУЛЬТУР СЕВООБОРОТОВ НА ПЛОТНОСТЬ ПОЧВЫ

Сергей Анатольевич Замятин, кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID: 0000-0002-3999-9179
Александр Константинович Свечников, кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID: 0000-0002-0070-5348

Марийский научно-исследовательский институт сельского хозяйства —
филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого»,
п. Руэм, Республика Марий Эл, Россия
E-mail: zamyatin.ser@mail.ru

Аннотация. Цель исследований — изучение и оценка плотности почвы как одного из важнейших агрофизических ее свойств. В 1996–2021 годах проводили двухфакторный опыт с двумя закладками: фактор А — севообороты (один зерно-травяной и три плодосменные), фактор В — уровень внесения минеральных удобрений. Установлено, что плотность сложения почвы под многолетними бобовыми травами в слое 0–20 см составляет 1,28–1,34 г/см³, озимыми культурами — 1,28–1,29, яровыми — 1,24–1,26, картофелем — 1,12–1,15 г/см³. К концу вегетации плотность почвы снижается. Длительное применение минеральных удобрений способствует развитию корневой системы растений и разуплотнению почвы. В среднем за ротацию севооборотов наименьшая плотность была под культурами второго плодосменного севооборота, где использовали навоз под картофель. В начале вегетации она составила 1,23–1,24 г/см³. Возделывание картофеля без органических удобрений в I и III плодосменных севооборотах повысило плотность почвы на 0,01 г/см³. Применение многолетних трав без возделывания картофеля еще больше увеличило плотность почвы в начале и середине вегетации до 1,26–1,27 г/см³, к концу разница между плотностью почвы зерно-травяного и плодосменных севооборотов составила 0,03–0,04 г/см³.

Ключевые слова: Республика Марий Эл, полевые севообороты, многолетние бобовые травы, дерново-подзолистая почва, минеральные удобрения, плотность почвы

INFLUENCE OF CROP ROTATIONS ON SOIL DENSITY

S.A. Zamyatin, PhD in Agricultural Sciences

A.K. Svechnikov, PhD in Agricultural Sciences

Mari Agricultural Research Institute — Mari Agricultural Research Institute —
Branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,
Ruem, Mari El Republic, Russia
E-mail: zamyatin.ser@mail.ru

Abstract. The survey objective is to study and evaluate soil density as one of its most important agrophysical properties. A two-factor experiment was conducted with two establishment of trial in 1996–2021 yrs.: factor A — crop rotations (one grain-grass and three fruit-changing), factor B — the level of mineral fertilizers. For the first time in the Mari El Republic, it was studied and found that the soil bulk density under perennial legumes in a layer of 0–20 cm was 1.34–1.28 g/cm³, under winter crops 1.29–1.28 g/cm³, spring crops 1.26–1.24 g/cm³, potatoes 1.15–1.12 g/cm³. Soil density decreased by the end of the growing season. Long-term fertilizations promotes the root development and leads to soil decompaction. The lowest average density per rotation was under the crops of the second crop rotation, where manure was used for potatoes. It was 1.24–1.23 g/cm³ at the beginning of the growing season. Potato cultivation increased soil density by 0.01 g/cm³ without organic fertilizations in crop rotations I and III. Perennial grasses without growing potatoes further increased the soil density at the vegetation beginning to 1.27–1.26 g/cm³. This trend persisted under crop rotations by the middle of the growing season. The difference between the soil density of grain-grass and fruit-changing crop rotations was 0.03–0.04 g/cm³ by the vegetation end.

Keywords: Mari El Republic, field crop rotations, perennial legumes, sod-podzolic soil, fertilizers, soil density

Рациональная структура посевов, ориентированная на почвенно-климатические особенности зоны, позволяет полноценно использовать пашню, произвести большее количество растениеводческой продукции и обеспечить охрану окружающей среды. [17]

Среди факторов, определяющих величину урожая, значительная роль принадлежит показателю физического состояния почвы — плотности, которая обуславливает интенсивность микробиологической активности почвы и трансформации питательных веществ. [9] Объемная масса почвы в земледелии среди известных агрофизических характеристик имеет наиболее тесную связь с урожайностью сельскохозяйственных культур. [6, 28] Основная причина снижения урожая при уплотне-

нии почвы — ухудшение условий для формирования мощной корневой системы растений и активной ее деятельности. [1, 23] При оптимальной (1,0 ... 1,3 г/см³) плотности почвы создается благоприятный водный, тепловой, воздушный и питательный режимы в ее плодородном слое. Под влиянием интенсивной нагрузки сельскохозяйственной техники агрофизический показатель может повышаться до 1,4...1,6 г/см³ и более, в то же время переуплотняется не только пахотный, но и подпахотный слой. [6] Чем плотнее почва, тем труднее проникает корневая система в нижние слои, это отрицательно сказывается на продуктивности растений. Установлено, что повышение плотности почвы увеличивает пораженность зерновых культур корневой гнилью. [10]

Согласно результатам исследований плотность почвы зависит от ее обработки. [2, 3, 11, 12, 15, 18, 27] Наименьшую величину объемной массы почвы в слоях 0...10 и 10...20 см обеспечивает весенняя традиционная вспашка плугом ПН-3-35 на глубину 20...22 см (1,20 и 1,34 г/см³ соответственно). Безотвальная «глубокая» обработка достоверно увеличивает ($НСП_{05} = 0,01$ г/см³) данный показатель в изучаемых слоях почвы на 0,02 г/см³, а стерневой культиватор во втором слое — на 0,23 г/см³. Безотвальная «мелкая» и минимальная обработки к осеннему периоду приводили к наименьшей плотности сложения слоя 0...10 см (1,36 и 1,38 г/см³ соответственно), вспашки достоверно увеличивали данный показатель на 0,03...0,06 г/см³ ($НСП_{05} = 0,02$ г/см³). Более низкие показатели плотности почвы при мелких обработках обусловлены сосредоточением максимального количества полуразложившегося органического вещества в верхнем слое. При этом плотность почвы в слое 10...20 см была выше в вариантах с поверхностными обработками. [4] Зарубежные ученые отмечают, что уплотнение почвы в результате движения тяжелой техники привело к значительному снижению урожайности сельскохозяйственных культур, которое достигало 50% в зависимости от величины и степени уплотнения. [20, 24, 25, 27, 30]

По данным В.В. Гангура в разноротационных севооборотах левобережной лесостепи Украины на типичных малогумусных тяжелосуглинистых черноземах уменьшение плотности почвы наблюдается в полях после вико-овсяной смеси, гороха и сои. [6] Пропашные культуры (сахарная свекла, кукуруза) увеличивают плотность почвы. В основном это обусловлено механическим воздействием сельскохозяйственной техники.

Полевые севообороты также влияют на плотность почвы. [8, 14] М.М. Сабитов установил, что плотность в зернотравяном севообороте снижается на 0,14 г/см³ по отношению к зернопаровому, наименьшая — в зернотравяном при возделывании люпина по предшественнику однолетние травы — 0,90 г/см³. [14] На серой лесной почве Владимирского Ополья оптимальная плотность для возделывания озимой ржи (1,24...1,39 г/см³) формировалась после уборки многолетних трав второго года пользования (г.п.). В посевах яровой пшеницы и ячменя только проведение основной обработки на глубину 20...22 см полностью устраняло переуплотнение почвы. [8]

На дерново-подзолистой почве в Республике Марий Эл в конце второй ротации севооборота плотность сложения пахотного слоя варьировала в зависимости от изучаемых факторов. Наилучшие для выращивания сельскохозяйственных культур показатели плотности отмечали при использовании в севообороте сидерального пара, с чистым паром плотность была выше на 0,02 г/см³, занятым — 0,08...0,09 г/см³. [13]

По некоторым исследованиям почва достигает наибольшей плотности под клевером первого, второго г.п. (1,36 и 1,40 г/см³ соответственно) и озимой пшеницей (1,37 г/см³). [19]

Уплотнение почвы до 1,60 г/см³ от ее переувлажнения оказывает негативное воздействие на рост корней и побегов пшеницы. [31] На уплотненных

почвах обычная обработка приводит к уменьшению корневой системы кукурузы, что значительно увеличивает ее полегание. [22]

Многие исследователи отмечают положительный эффект плотности почвы на развитие корневой системы некоторых культур, при 1,50 г/см³ наступает более тесный контакт между корнями и почвой. На менее уплотненной почве (1,10 г/см³) увеличивается количество и диаметр корней. [21, 22, 26, 29]

Экспериментально установлена корреляционная зависимость между плотностью почвы и нитратным азотом ($r = -0,689 \pm 0,194$), подвижным фосфором ($r = -0,709 \pm 0,188$), обменным калием ($r = 0,762 \pm 0,173$). [16] Уплотнение почвы значительно снижает поглощение питательных веществ пшеницей: на 12...35% азота, 17...27 фосфора и до 24% калия. [24]

Цель работы — изучить влияние культур севооборотов и минеральных удобрений на плотность почвы в Республике Марий Эл.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Многолетний двухфакторный опыт проведен на поле Марийского НИИСХ — филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в 1996–2021 годах (табл. 1).

Из озимых культур пшеницу возделывали в 1997 году и с 2000 по 2008 год, рожь — в 1999 и с 2009 по 2021. В 1996 году во II плодосменном севообороте взамен вики с овсом на зерно высевали горохо-ячменную смесь. После засухи 2010 года, когда не возшел клевер, в 2011 высевали однолетние травы — вику с овсом.

Все агротехнические мероприятия проводили в соответствии с зональными рекомендациями. Согласно схеме опыта, минеральные удобрения вносили перед посевом культур поделочно в виде аммиачной селитры, двойного суперфосфата и хлористого калия. Под бобовые культуры азотные удобрения не применяли. Повторность — трехкратная. Общая площадь делянок первого порядка 330 м², второго — 165 м².

При проведении исследований руководствовались Методикой полевого опыта. [7] Плотность почвы определяли по методу М.А. Качинского. [5] Основные результаты исследований статистически обрабатывали на персональном компьютере.

Таблица 1.

Схема опыта	
Фактор А (севооборот)	Фактор В (минеральные удобрения)
1. Зернотравяной (овес + клевер, клевер первого г.п., озимые, вика/овес на зерно, яровая пшеница, ячмень) — контроль	Без удобрений $N_{60} P_{60} K_{60}$
2. I плодосменный (вика/овес на зеленую массу, озимые, ячмень, картофель, вика/овес на зерно, яровая пшеница)	Без удобрений $N_{60} P_{60} K_{60}$
3. II плодосменный (вика/овес на зерно, яровая пшеница, картофель (навоз 80 т/га), ячмень + клевер, клевер первого г.п., озимые)	Без удобрений $N_{60} P_{60} K_{60}$
4. III плодосменный (ячмень + клевер, клевер первого г.п., клевер второго г.п., озимые, картофель, овес)	Без удобрений $N_{60} P_{60} K_{60}$

Погодные условия были удовлетворительными для роста и развития полевых культур в севооборотах. Неблагополучные по количеству выпавших осадков и температурному режиму — 1998, 2003, 2009, 2010, 2014, 2018 и 2021 годы, гидротермический коэффициент (ГТК) за вегетационный период — 0,97, 0,56, 0,77, 0,37, 0,84, 0,87 и 0,84 соответственно. Относительно влажными были 2000, 2003, 2006, 2008, 2017 и 2020 годы, ГТК — 1,73, 1,64, 1,48, 1,71, 1,85 и 1,86 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно нашим наблюдениям наибольшая плотность почвы в слое 0...20 см под культурами севооборотов на протяжении 25 лет (1996–2021) была под многолетними травами (табл. 2).

В начале вегетации под клевером второго г.п. почва была более плотной (1,33...1,34 г/см³), чем под клевером первого г.п. (1,28...1,29 г/см³). Высокая плотность почвы была под озимыми культурами (1,28...1,29 г/см³), яровыми (овес, ячмень, яровая пшеница, вика-овсяная смесь, выращиваемая как на зерно, так и зеленый корм) в начале вегетации — 1,24...1,26 г/см³, наименьшая в начале вегетации — под картофелем (1,15 г/см³). Внесение навоза под картофель снижало плотность почвы до 1,13...1,12 г/см³ (на 0,2 г/см³). Под яровыми культурами к концу вегетации объемная масса почвы снизилась на 0,3...0,4 г/см³.

В начале вегетации растений применение минеральных удобрений не отражалось на показателе плотности почвы по сравнению с естественным

фоном питания, к концу в варианте без удобрений плотность увеличивалась.

За время исследований прошло четыре ротации севооборотов в двух закладках (табл. 3). Применение минеральных удобрений в начале вегетации первой ротации не повлияло на плотность почвы, разница — 0,001 ± 0,013 г/см³.

Во второй, третьей и четвертой ротациях разница плотности почвы в начале вегетации на разных фонах удобрений составила 0,006...0,008 г/см³, к середине вегетации в первой ротации — 0,002 г/см³, второй — 0,007, третьей — 0,007, четвертой — 0,010 г/см³. К концу вегетации с применением минеральных удобрений в первой ротации она стала 0,003 г/см³, второй, третьей и четвертой — 0,01 г/см³. Это свидетельствует о том, что длительное применение минеральных удобрений увеличивает показатели плодородия почвы, поэтому развитие корневой системы идет более интенсивно и почва разуплотняется.

В среднем за ротацию севооборотов наименьшая плотность была под культурами II плодосменного севооборота, где применяли навоз под картофель (см. рисунок). В начале вегетации она составила 1,23...1,24 г/см³. Возделывание картофеля без органических удобрений в I и III плодосменном севооборотах повысило плотность почвы на 0,01 г/см³. Многолетние травы увеличили объемную массу почвы в начале вегетации до 1,26...1,27 г/см³, к концу разница между плотностью почвы в зернотравяном и плодосменных севооборотах составила 0,03...0,04 г/см³.

Выводы. Таким образом, в среднем по севооборотам плотность почвы была на оптимальном уровне и не превышала в начале вегетации 1,27 г/см³. При-

Таблица 2.

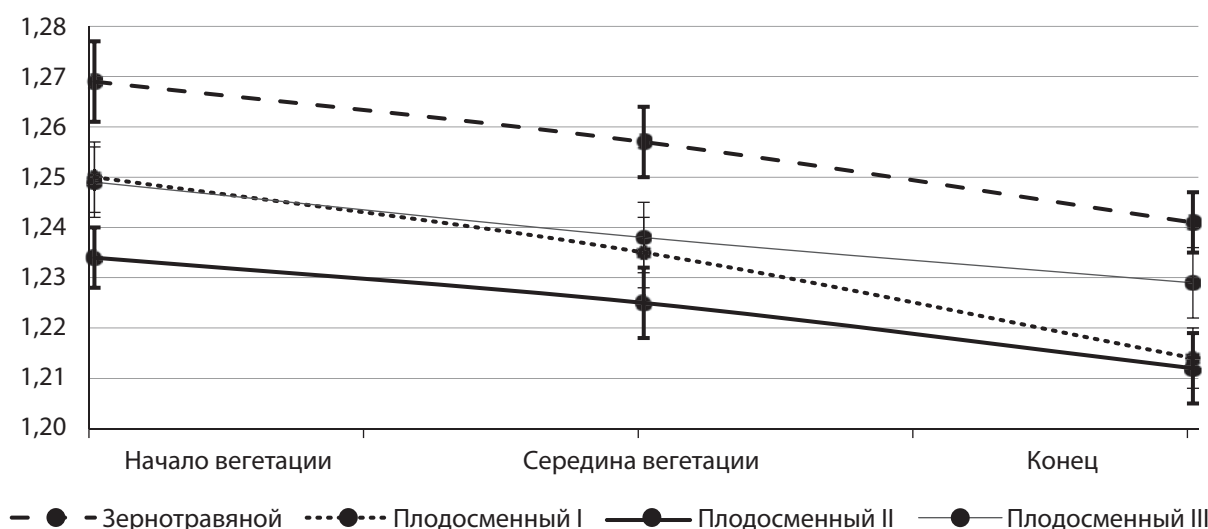
Плотность почвы под культурами севооборотов в слое 0...20 см, г/см³

Культура	Начало вегетации		Середина вегетации		Конец вегетации	
	без удобрений	NPK	без удобрений	NPK	без удобрений	NPK
Овес	1,254±0,013	1,249±0,013	1,243±0,013	1,234±0,014	1,225±0,013	1,216±0,013
Ячмень	1,254±0,011	1,247±0,01	1,245±0,011	1,236±0,011	1,224±0,009	1,213±0,008
Яровая пшеница	1,253±0,016	1,249±0,015	1,246±0,012	1,239±0,011	1,218±0,009	1,212±0,008
Вика/овес	1,256±0,011	1,249±0,011	1,239±0,01	1,231±0,010	1,215±0,007	1,208±0,008
Горох/ячмень	1,267±0,015	1,264±0,081	1,260±0,017	1,252±0,022	1,239±0,017	1,222±0,019
Озимая пшеница	1,288±0,015	1,285±0,014	1,267±0,016	1,265±0,015	1,266±0,012	1,259±0,012
Озимая рожь	1,288±0,009	1,283±0,009	1,282±0,01	1,274±0,011	1,284±0,010	1,274±0,01
Картофель	1,152±0,009	1,151±0,009	1,140±0,008	1,13±0,0070	1,126±0,008	1,118±0,009
Картофель (навоз)	1,120±0,014	1,114±0,014	1,116±0,012	1,109±0,013	1,098±0,006	1,091±0,007
Клевер первого г.п.	1,289±0,012	1,284±0,011	1,281±0,011	1,279±0,010	1,281±0,010	1,277±0,010
Клевер второго г.п.	1,337±0,015	1,326±0,016	1,323±0,013	1,321±0,013	1,317±0,013	1,313±0,011
Вика/овес (з.м.)	1,258±0,020	1,246±0,02	1,236±0,024	1,228±0,023	1,221±0,019	1,211±0,019

Таблица 3.

Плотность почвы в зависимости от ротации севооборотов в слое 0...20 см, г/см³

Ротация	Начало вегетации		Середина вегетации		Конец вегетации	
	без удобрений	NPK	без удобрений	NPK	Без удобрений	NPK
Первая	1,241±0,009	1,240±0,009	1,230±0,009	1,228±0,009	1,220±0,008	1,217±0,008
Вторая	1,264±0,011	1,256±0,011	1,251±0,011	1,244±0,011	1,226±0,009	1,216±0,009
Третья	1,247±0,010	1,240±0,010	1,237±0,010	1,229±0,010	1,224±0,010	1,214±0,010
Четвертая	1,261±0,010	1,254±0,010	1,252±0,010	1,242±0,010	1,233±0,010	1,223±0,011



Плотность почвы под культурами севооборотов в слое 0...20 см, г/см³

менение минеральных удобрений способствовало лучшему развитию корневой системы растений. После отмирания и разложения корней формировались микропоры, что обеспечивало снижение плотности почвы. Действие удобрений в первой ротации севооборотов слабее сказалось на разнице в плотности почвы, во второй, третьей и четвертой оно было более выраженным. Наибольшая плотность почвы отмечена под многолетними бобовыми травами и озимыми культурами. Частые механические обработки под картофелем ее уменьшали (в конце вегетации — 1,12...1,13 г/см³). Внесение органических удобрений под картофель снизили плотность почвы до 1,09 г/см³. К концу вегетации происходит разуплотнение почвы, но под многолетними травами и озимыми культурами этот процесс идет менее интенсивно, чем под яровыми.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Балабанов С.С. и др. Биологизация земледелия и плотность почвы в зернопаропашном севообороте // Вестник Курской ГСХА. 2013. № 1. С. 68–70.
- Беленков А.И., Пискунова А.С. Урожайность полевых культур и плодородие дерново-подзолистой почвы в зависимости от обработки в опыте ЦТЗ // Агроэкологические проблемы почвоведения и земледелия. Курск: ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2019. С. 48–52.
- Благополучная О.А., Девтерова Н.И. Нетрадиционные энергосберегающие способы обработки почв тяжелого механического состава в звене севооборота // Новые технологии. 2020. № 1. С. 124–131. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10113.
- Богомолова Ю.А., Саков А.П., Ивенин А.В. Влияние обработки почвы и удобрений на изменения ее агрофизических свойств и урожайность сои в звене зернового севооборота // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. Т. 64. № 3. С. 62–69. DOI: 10.30766/2072-9081.2018.64.3.62-69.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 415 с.
- Гангур В.В. Влияние сельскохозяйственных культур, их соотношения в разноротационных севооборотах левобережной лесостепи Украины на плотность почвы и урожайность // Вестник Прикаспия. 2018. № 1 (20). С. 36–43.
- Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Зинченко С.И. Изменение плотности сложения в агроэкосистемах серой лесной почвы // Владимирский земледелец. 2020. № 4 (94). С. 4–7. DOI: 10.24411/2225-2584-2020-10137.
- Калинин О.С., Кравченко Р.В. Влияние систем основной обработки почвы и предшественников на плотность почвы в посевах сахарной свеклы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. 2021. № 173. С. 61–75. DOI: 10.21515/1990-4665-173-006.
- Козлова Л.М., Носкова Е.Н., Попов Ф.А. Оценка развития болезней зерновых культур при ресурсосберегающих системах обработки почвы и применении биопрепаратов в адаптивно-ландшафтном земледелии // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. Т. 21. № 6. Р. 721–732. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.6.721-732.
- Конищев А.А., Гарифуллин И.И., Конищева Е.Н. О методике использования характеристики «Оптимальная плотность» в исследованиях по обработке почвы // Владимирский земледелец. 2019. № 1 (87). С. 16–20. DOI: 10.24411/2225-2584-2019-10047.
- Кузыченко Ю.А., Кобозев А.К. Физическое состояние пахотного слоя почвы при различных способах основной обработки в звене севооборота // Сельскохозяйственный журнал. 2018. Т. 1. № 11. С. 27–31.
- Новоселов С.И., Кузьминых А.Н., Еремеев Р.В. Плодородие почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур в зависимости от основной обработки и севооборота // Плодородие. 2019. № 6 (111). С. 22–25. DOI: 10.25680/S19948603.2019.111.06.
- Сабитов М.М. Севооборот — основа стабилизации плодородия почв и продуктивности культур // Известия Самарского научного центра РАН. 2019. Т. 21. № 6 (92). С. 89–94. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-12.
- Самаркин А.А. и др. Плотность сложения пахотного слоя почвы в зависимости от приемов обработки почвы, схемы и способов посадки картофеля // Вестник Казанского ГАУ. 2017. Т. 12. № 1 (43). С. 36–39. DOI: 10.12737/article_59368709c7e266.13191535.

16. Чевердин Ю.И. Взаимосвязь плотности сложения с эффективным плодородием почв // Итоги и перспективы развития агропромышленного комплекса. Прикаспийский НИИ аридного земледелия, 2018. С. 185–186.
17. Черкасов Г.Н., Акименко А.С. Совершенствование севооборотов и структуры посевных площадей для хозяйств различной специализации Центрального Черноземья // Земледелие. 2016. № 5. С. 8–11.
18. Щигрова Л.И., Николаев В.А. Оценка структурного состояния дерново-подзолистой почвы по ее плотности // Доклады ТСХА. М.: Российский ГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. С. 187–190.
19. Эседуллаев С.Т., Мельцаев И.Г. Биологизированные севообороты – основной фактор повышения плодородия дерново-подзолистых почв и продуктивности пашни в Верхневолжье // Аграрный вестник Урала. 2019. № 11 (190). С. 18–26. DOI: 10.32417/article_5dcd861e3d2300.42959538.
20. Abu-Hamdeh N.H. Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density // Soil & Water Management & Conservation. 2003. Vol. 67. № 4. P. 1213–1219. DOI: 10.2136/sssaj2003.1213.
21. Atkinson B.S., Sparkes D.L., Mooney S.J. Effect of seed-bed cultivation and soil macrostructure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*) // Soil and tillage research. 2009. Vol. 103. № 2. P. 291–301. DOI: 10.1016/j.still.2008.10.027.
22. Bian D. et al. Effects of tillage practices on root characteristics and root lodging resistance of maize // Field Crops Research. 2016. Vol. 185. P. 89–96. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.008.
23. Busari M.A. et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment // International soil and water conservation research. 2015. Vol. 3. № 2. С. 119–129. DOI: 10.1016/j.iswcr.2015.05.002.
24. Ishaq M. et al. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum // Soil and tillage research. 2001. Vol. 60. № 3. P. 153–161. DOI: 10.1016/S0167-1987(01)00177-5.
25. Raghavan G.S.V. et al. Vehicular traffic effects on development and yield of corn (maize) // Journal of Terramechanics. 1979. Vol. 16. № 2. P. 69–76. DOI: 10.1016/0022-4898(79)90002-8.
26. Scott D.I. et al. The effects of wheel-induced soil compaction on anchorage strength and resistance to root lodging of winter barley (*Hordeum vulgare* L.) // Soil and Tillage Research. 2005. Vol. 82. № 2. P. 147–160. DOI: 10.1016/j.still.2004.06.008.
27. Shaheeb M.R., Venkatesh R., Shearer S.A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production // J. Biosyst. Eng. 2021. Vol. 46. № 4. P. 417–439. DOI: 10.1007/s42853-021-00117-7.
28. Thomas G.W., Haszler G.R., Blevins R.L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the proctor test // Soil Science. 1996. Vol. 161. № 8. С. 502–508.
29. Tracy S.R. et al. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography // Annals of Botany. 2012. Vol. 110. № 2. P. 511–519. DOI: 10.1093/aob/mcs031.
30. Voorhees W.B. Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize // Advances in Geocology. 2000. № 32. P. 331–338.
31. Wu X. et al. Individual and combined effects of soil water-logging and compaction on physiological characteristics of wheat in southwestern China // Field Crops Research. 2018. Vol. 215. P. 163–172. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.10.016.

REFERENCES

1. Balabanov S.S. i dr. Biologizaciya zemledeliya i plotnost' pochvy v zernoparopropashnom sevooborote // Vestnik Kurskoj GSKHA. 2013. № 1. S. 68–70.
2. Belenkov A.I., Piskunova A.S. Urozhajnost' polevyh kul'tur i plodorodie dernovo-podzolistoj pochvy v zavisimosti ot obrabotki v opyte CTZ // Agroekologicheskie problemy pochvovedeniya i zemledeliya. Kursk: FGBNU «Kurskij FANC», 2019. S. 48–52.
3. Blagopoluchnaya O.A., Devterova N.I. Netradicionnye energosberegayushchie sposoby obrabotki pochv tyazhelogo mekhanicheskogo sostava v zvne sevooborota // Novye tekhnologii. 2020. № 1. S. 124–131. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10113.
4. Bogomolova Yu.A., Sakov A.P., Ivenin A.V. Vliyanie obrabotki pochvy i udobrenij na izmeneniya ee agrofizicheskikh svojstv i urozhajnost' soi v zvne zernovogo sevooborota // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2018. T. 64. № 3. S. 62–69. DOI: 10.30766/2072-9081.2018.64.3.62-69.
5. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Metody issledovaniya fizicheskikh svojstv pochv. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Agropromizdat, 1986. 415 s.
6. Gangur V.V. Vliyanie sel'skohozyajstvennyh kul'tur, ih sootnosheniya v raznorotacionnyh sevooborotah levoberezhnoj lesostepi Ukrainy na plotnost' pochvy i urozhajnost' // Vestnik Prikaspiya. 2018. № 1 (20). S. 36–43.
7. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta. 5-e izd., dop. i pererab. M.: Agropromizdat, 1985. 351 s.
8. Zinchenko S.I. Izmenenie plotnosti slozheniya v agroekosistemah seroj lesnoj pochvy // Vladimirskij zemledec. 2020. № 4 (94). S. 4–7. DOI: 10.24411/2225-2584-2020-10137.
9. Kalinin O.S., Kravchenko R.V. Vliyanie sistem osnovnoj obrabotki pochvy i predshestvennikov na plotnost' pochvy v posevah saharnej svekly // Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo GAU. 2021. № 173. S. 61–75. DOI: 10.21515/1990-4665-173-006.
10. Kozlova L.M., Noskova E.N., Popov F.A. Ocenka razvitiya boleznej zernovyh kul'tur pri resursosberegayushchih sistemah obrabotki pochvy i primenenii biopreparatov v adaptivno-landshaftnom zemledelii // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2020. T. 21. № 6. P. 721–732. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.6.721-732.
11. Konishchev A.A., Garifullin I.I., Konishcheva E.N. O metodike ispol'zovaniya harakteristiki «Optimal'naya plotnost'» v issledovaniyah po obrabotke pochvy // Vladimirskij zemledec. 2019. № 1 (87). S. 16–20. DOI: 10.24411/2225-2584-2019-10047.
12. Kuzychenko Yu.A., Kobozev A.K. Fizicheskoe sostoyanie pahotnogo sloya pochvy pri razlichnyh sposobah osnovnoj obrabotki v zvne sevooborota // Sel'skohozyajstvennyj zhurnal. 2018. T. 1. № 11. S. 27–31.
13. Novoselov S.I., Kuz'minyh A.N., Ereemeev R.V. Plodorodie pochvy i produktivnost' sel'skohozyajstvennyh kul'tur v zavisimosti ot osnovnoj obrabotki i sevooborota // Plodorodie. 2019. № 6 (111). S. 22–25. DOI: 10.25680/S19948603.2019.111.06.
14. Sabitov M.M. Sevooborot – osnova stabilizacii plodorodiya pochv i produktivnosti kul'tur // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2019. T. 21. № 6 (92). S. 89–94. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-12.

15. Samarkin A.A. i dr. Plotnost' slozheniya pahotnogo sloya pochvy v zavisimosti ot priemov obrabotki pochvy, skhemy i sposobov posadki kartofelya // Vestnik Kazanskogo GAU. 2017. T. 12. № 1 (43). S. 36–39. DOI: 10.12737/article_59368709c7e266.13191535.
16. Cheverdin Yu.I. Vzaimosvyaz' plotnosti slozheniya s effektivnym plodorodiem pochv // Itogi i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa. Prikaspijskij NII aridnogo zemledeliya, 2018. S. 185–186.
17. Cherkasov G.N., Akimenko A.S. Sovershenstvovanie sevooborotov i struktury posevnyh ploschadej dlya hozyastv razlichnoj specializacii Central'nogo Chernozem'ya // Zemledelie. 2016. № 5. S. 8–11.
18. Shchigrova L.I., Nikolaev V.A. Ocenka strukturnogo sostoyaniya dernovo-podzolistoj pochvy po ee plotnosti // Doklady TSKHA. M.: Rossijskij GAU – MSKHA im. K.A. Timiryazeva, 2021. S. 187–190.
19. Esedullaev S.T., Mel'caev I.G. Biologizirovannye sevooboroty – osnovnoj faktor povysheniya plodorodiya dernovo-podzolistyh pochv i produktivnosti pashni v Verhnevolzh'e // Agrarnyj vestnik Urala. 2019. № 11 (190). S. 18–26. DOI: 10.32417/article_5dcd861e3d2300.42959538.
20. Abu-Hamdeh N.H. Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density // Soil & Water Management & Conservation. 2003. Vol. 67. № 4. P. 1213–1219. DOI: 10.2136/sssaj2003.1213.
21. Atkinson B.S., Sparkes D.L., Mooney S.J. Effect of seedbed cultivation and soil macrostructure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*) // Soil and tillage research. 2009. Vol. 103. № 2. P. 291–301. DOI: 10.1016/j.still.2008.10.027.
22. Bian D. et al. Effects of tillage practices on root characteristics and root lodging resistance of maize // Field Crops Research. 2016. Vol. 185. P. 89–96. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.008.
23. Busari M.A. et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment // International soil and water conservation research. 2015. Vol. 3. № 2. S. 119–129. DOI: 10.1016/j.iswcr.2015.05.002.
24. Ishaq M. et al. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum // Soil and tillage research. 2001. Vol. 60. № 3. P. 153–161. DOI: 10.1016/S0167-1987(01)00177-5.
25. Raghavan G.S.V. et al. Vehicular traffic effects on development and yield of corn (maize) // Journal of Terramechanics. 1979. Vol. 16. № 2. P. 69–76. DOI: 10.1016/0022-4898(79)90002-8.
26. Scott D.I. et al. The effects of wheel-induced soil compaction on anchorage strength and resistance to root lodging of winter barley (*Hordeum vulgare* L.) // Soil and Tillage Research. 2005. Vol. 82. № 2. P. 147–160. DOI: 10.1016/j.still.2004.06.008.
27. Shaheb M.R., Venkatesh R., Shearer S.A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production // J. Biosyst. Eng. 2021. Vol. 46. № 4. P. 417–439. DOI: 10.1007/s42853-021-00117-7.
28. Thomas G.W., Haszler G.R., Blevins R.L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the proctor test // Soil Science. 1996. Vol. 161. № 8. S. 502–508.
29. Tracy S.R. et al. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography // Annals of Botany. 2012. Vol. 110. № 2. P. 511–519. DOI: 10.1093/aob/mcs031.
30. Voorhees W.B. Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize // Advances in Geoecology. 2000. № 32. P. 331–338.
31. Wu X. et al. Individual and combined effects of soil waterlogging and compaction on physiological characteristics of wheat in southwestern China // Field Crops Research. 2018. Vol. 215. P. 163–172. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.10.016.

Поступила в редакцию 01.03.2023

Принята к публикации 15.03.2023