

Борис БОИНЧАН ▪ Давид ДЕНТ

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ НА ЧЕРНОЗЕМАХ

АДАПТИВНЫЙ
МЕНЕДЖМЕНТ ПОЧВ

Земледелие на черноземах

Борис Боинчан • Давид Дент

Земледелие на черноземах

адаптивный менеджмент почв



Борис Боинчан
Научно-исследовательский институт полевых культур «Селекция»,
Государственный университет им. Алеку Руссо,
Бельцы, Молдова

Давид Дент
Chestnut Tree Farmhouse, Fornsett End
Норфолк, Великобритания.

Название книги в оригинале: Farming the black earth. Sustainable and climate-smart management of chernozem soils, Boris Boincean & David Dent

Издание публикуется с согласия издательства Springer Nature Switzerland AG
© Springer Nature Switzerland AG 2019. Все права защищены.

Переводчик с английского языка: доктор биологических наук, профессор Велисар С.Г.

Книга опубликована в рамках проекта «Органическое интенсивное земледелие: совместные усилия по созданию благоприятной среды для экологических фермеров в Республике Молдова», финансируемого Агентством Министерства экономики и экологической политики – Нидерланды, и реализуемого организацией People in Need Moldova в партнерстве с Prograin Organic.

Мнения, высказанные в данной книге, принадлежат авторам и не обязательно отражают позицию организации People in Need Moldova или Агентства в Министерстве экономики и экологической политики – Нидерланды.

Editura PRUT

Editura Prut Internațional, str. Alba Iulia, nr. 23, bl. 1 A, MD-2051, Chișinău
Tel.: (+373 22) 75 18 74; (+373 22) 74 93 18
www.edituraprut.md; e-mail: office@prut.ro

© Editura Prut Internațional, 2020

Corector: Tatiana Șarșova
Copertă: Sergiu Stanciu
Paginare computerizată: Adrian Grosu

ISBN 978-9975-54-486-3
CZU 631.445.4
Б 775

Предисловие

Канадский эколог и философ Стэн Роу (*Stan Rowe*) описывает экосферу нашей планеты как «творчески развитую и развивающуюся оболочку из живых организмов, воздуха, воды и почв, которая окутывает Вселенную». Я не могу представить себе лучшего примера экосферного продукта, чем черная почва, или чернозем. Это не почва в изоляции, скорее, это многолетние травы и разнотравье, ассоциированные с относительно поверхностными камнями и минералами, а также с миллиардами почвенных бактерий, грибов, нематод, дождевых червей и муравьев, взаимодействующих с годовым количеством осадков от 350 до 1500 мм и среднегодовой температурой в диапазоне от -4°C до $+16^{\circ}\text{C}$. Протекающие в течение тысячелетий, эти взаимодействия накапливают темные гуминовые вещества, которые прилипают к мелким минеральным частицам почвы, затем склеиваются в небольшие скопления. В черноземе вода и воздух диффундируют через хорошо развитые макропоры, а микробы и корни распространяются на значительную глубину. Это и есть экосфера, создающая высокопродуктивную живую систему, которая поддерживает собственное плодородие, накапливает углерод, высвобождает чистую воду и питается от солнечных лучей.

Уэс Джексон (*Wes Jackson*), соучредитель Института земли (*The Land Institute*) в Салине, штат Канзас (США), рассматривает первоначальное нарушение почвы ранними фермерами для выращивания однолетних зерновых культур как пример, казалось бы, неугасимого стремления нашего вида использовать запасы плотного углерода. В случае черноземов, которые характеризуются своим глубоким верхним слоем почвы, богатым органикой и, следовательно, богатым углеродом, это нарушение обработкой почвы привело к существенному притоку доступного азота, фосфора и других питательных веществ. Благодаря использованию запасов ценных питательных веществ из углеродного капитала почвы, накопленного в течение тысячелетий в черноземе, было выращено зерно, и его калории способствовали развитию общества, позволяя нашим предкам выявлять и эксплуатировать новые фракции высокоплотного углерода. В своей книге «Консультируясь с Гением Места» (*Consulting the Genius of the Place: An Ecological Approach to a New Agriculture*) Уэс Джексон предполагает, что после успешной эксплуатации углерода в почвах мы стали использовать лесной углерод в форме дров для производства бронзы, а затем железа. Третьим резервуаром углерода стал уголь, который

совпал с началом промышленной революции. Четвертый бассейн – нефть, а пятый – природный газ. Хотя только первый пул плотного углерода, который описал Джексон, был напрямую связан с сельским хозяйством, каждый последующий пул помог людям активизировать и укрепить нашу приверженность к выращиванию однолетних зерновых.

В книге «Земледелие на черноземе» (*Farming the Black Earth*) исследователи Борис Боинчан и Давид Дент (*David Dent*) рассматривают непосредственно различия, возникшие между природными экосистемами и агроэкосистемами на пахотных землях, сосредоточив внимание на наиболее продуктивных сельскохозяйственных почвах на планете, на том, как мы способствовали их деградации, как мы в конечном итоге можем преобразовать земледелие, перейдя от деградирования почв к их созиданию, и как нам лучше с этим справиться. Это редкая книга по сельскому хозяйству, в которой целостность природных экосистем выдвигается на первый план и обосновывается в качестве стандарта, по которому следует определять и оценивать системы земледелия. Авторы описывают не только используемые пастбища, на которых образовались черноземы, в качестве стандарта для оценки текущей сельскохозяйственной практики, но и делают следующий шаг – предлагают способы, с помощью которых сельское хозяйство может стать более похожим на ранее существовавшую природную экосистему. Выделив при этом два способа усовершенствования агроэкосистемы – разнообразие культур и сокращение или полный отказ от вспашки, – авторы показывают, как устойчивая или экологическая интенсификация может начать заменять интенсификацию использования ресурсов.

Вполне уместно, что основным испытательным полигоном для примеров устойчивой интенсификации земледелия в черноземье является Научно-исследовательский институт полевых культур *Selectia* (НИИПК «Селекция») в Бельцкой степи Республики Молдова. Из всех стран мира в Молдове самая большая доля черноземных почв. Как и в случае с черноземом во всем мире, в Молдове произошла деградация, которую я описал выше. Фермеры в Молдове почти полностью исключили многолетние кормовые бобовые из своих севооборотов, и органическое вещество почвы продолжает снижаться. На этом фоне НИИПК «Селекция» (г. Бельцы, Республика Молдова) является полевой лабораторией многолетних агроэкологических экспериментов. Начиная с 1968 года Институт проводит оценку действия и взаимодействия обработки почвы, удобрения, разнообразия культур и севооборота на здоровье почвы, эффективность использования ресурсов и продуктивность сельскохозяйственных культур. В традициях таких известных научных центров, как *Rothamsted*, *Morrow* и *Sanborn*, проводимые в НИИПК «Селекция» исследования настоятельно подчеркивают ценность тщательно выполненных долгосрочных сельскохозяйственных исследований, и все эти данные закрепляют и подтверждают агроэкологические перспективы, изложенные в данной книге.

В Институте почв в Салине, штат Канзас, мы работаем над развитием зернового сельского хозяйства, которое функционирует больше как натуральные пастбища, в отличие от сельского хозяйства, которое было раньше. Для этого мы сначала разводим многолетние злаковые, бобовые и масличные культуры. Затем мы работаем, чтобы собрать их в экологически функциональные сообщества культур. Эта работа, выполняемая нашими научными сотрудниками и быстро

растущим списком сотрудников по всему миру, будет продолжаться не менее столетия, а может и больше. В результате агроэкосистемы смогут восполнять, а не истощать гумусовый горизонт нашего чернозема. Агроэкосистемы будут использовать солнечную энергию и обеспечивать большую часть собственного плодородия, и питательные вещества будут вымываться не больше, чем на местных прериях. Земледелие будет энергетически в плюсе, так как большая часть работы по выращиванию сельскохозяйственных культур выполняется экосистемой, что сводит к минимуму потребность в механизированных работах и индустриальных вложениях.

Но общество не может просто ждать десятки лет в бездействии, пока многолетние поликультуры заменят высокопродуктивные однолетние культуры, выращиваемые сегодня. Изменение климата наблюдается всё более ускоренными темпами, мертвые зоны продолжают образовываться там, где реки, загрязненные азотом, впадают в моря, а черноземные почвы продолжают терять углерод и разрушаться. Обнадеживающий урок этой книги заключается в том, что мы можем и должны уже сейчас сделать значительные улучшения в том, как мы работаем. Используя эталоны качества почв под залежью и обращая пристальное внимание на энергетические требования, предъявляемые к сельскому хозяйству, авторы книги приводят убедительные аргументы в пользу того, что земледелие может сохранить и даже постепенно улучшить черноземные почвы.

Том КРУЗ

Декабрь, 2018

Салина, штат Канзас

Благодарность

Данная книга подготовлена под вдохновляющим и направляющим влиянием профессора Раттан Лал (*Rattan Lal*). Это, несомненно, самый признанный во всем мире и самоотверженный ученый-почвовед, который возводит мосты между людьми по всему миру для лучшего понимания нашего общего богатства. Подготовительные работы были проведены в рамках программы Фулбрайта при поддержке правительства США. Фундаментальные данные были получены в результате многолетних полевых экспериментов в Научно-исследовательском институте полевых культур *Selectia* в Бельцах, Республика Молдова, где большая группа исследователей и техников работала около 60-ти лет; впоследствии пришла поддержка со стороны коллег по кафедре природных ресурсов и агроэкологии Государственного университета им. Алеку Руссо. Полезные идеи и рекомендации были внесены неугомонными и самоотверженными исследователями и приглашенными учеными из Центра управления и секвестрации углерода при Университете в Огайо, США, и из многих других исследовательских и образовательных центров Восточной и Западной Европы, России, Канады и США. Мы благодарим всех вас и, в частности, академика *Андрея Урсу* за предоставленные фотографии самой почвы и доктора *Zhanguo Bai*, который создал карты деградации земель в степях. Мы также выражаем признательность тем незаметным героям, которые пишут обзорные статьи, позволяющие нам связываться с тысячами команд по всем отраслям науки, и умелому редакторскому руководству *Juliana Pitanguy* из издательства "*Springer*". Авторы книги признательны Агентству Министерства экономики и экологической политики Нидерландов за финансовую поддержку в публикации книги. Мы признательны также неправительственной организации "*People in Need*" в лице Аллы Ионеску и Ольги Шупарски за оказанную поддержку в организации перевода и публикации книги на русском языке, издательству "*Прут*" за приложенные усилия по редактированию и публикации книги. Особые слова благодарности выражаем профессору *Софии Великсар* за бережный и скрупулезный профессиональный перевод текста книги на русский язык. Не в последнюю очередь мы благодарим наши семьи за поддержку в выполнении работы, которая была нами проведена.

Обзор

Какую более глупую вещь можно представить, кроме как называть золото, серебро и драгоценности драгоценными, а землю и почву основой?... если бы был столь же большой дефицит почвы, как драгоценностей или драгоценных металлов, не было бы принца, который бы не потратил бушель алмазов и рубинов и тележку золота только для того, чтобы иметь достаточно земли, чтобы посадить немного жасмина в небольшой горшок или посеять апельсиновое семя и наблюдать, как оно прорастает, растет и производит свои красивые листья, ароматные цветы и прекрасные фрукты.

Диалог о двух главнейших мировых системах.
Галилео Галилей (*Galileo Galilei*), 1632

Аннотация. Черная земля, чернозем – лучшая почва в мире. Она простирается широким поясом через степи Евразии и прерии Северной Америки. Исторически – житница западного мира, сегодня она дает половину всей пшеницы, продаваемой на международном рынке. Она была центром внимания с момента зарождения науки о почве в конце XIX века, но в течение прошлого столетия, под натиском все большей индустриализации сельского хозяйства, она претерпела глубокие, но в основном незамеченные изменения с далеко идущими известными и неизвестными последствиями.

За последние 35 лет спутниковые карты показывают устойчивое снижение продуктивности степей. Под натиском сухого климата, падающих цен на фермы и растущей зависимости от промышленных вложений – когда-то дешевые, а сейчас почти недоступные – чернозем потерял 30–70 процентов своего исходного содержания гумуса. Корень проблемы заключается в замене многолетней злаковой растительности однолетними культурами. Каждый год мы пашем, разрушаем верхний слой почвы и начинаем заново, обнажая почву до основания, вызывая вторжение сорняков и ускоряя разрушение органического вещества почвы, что приводит к эрозии самой почвы.

Новая парадигма устойчивой интенсификации построена на долгосрочных полевых экспериментах в степях и прериях: максимальный годовой возврат свежих органических остатков, непрерывное покрытие почвы культурами и мульчей из растительных остатков сельскохозяйственных культур, рациональное удобрение, нулевая обработка почвы (*no-till*) и интеграция растениеводства и животноводства в рамках разнообразных севооборотов.

Ключевые слова: чернозем, природные экосистемы, пахотные угодья, изменение климата, деградация земель, климатически рациональное земледелие, многолетние полевые эксперименты, органическое вещество почвы, севооборот.

Введение

Чернозем (англ. – *Black Earth*) – лучшая пахотная земля в мире. Он простирается на более чем 240 миллионах гектаров в широком поясе через евразийские степи и североамериканские прерии; родственная, известковая черная земля *Phaeozem* простирается через пампасы и Чако в Южной Америке. Близкий к ним тип почв засушливых районов – каштановые почвы (*Kastanozem*) степей с низким травостоем, он простирается на площади в два раза превышающей площадь черноземов на юге России, в Казахстане, Канаде, США и Мексике; это еще потенциально плодородные земли, но в то время, как чернозем обычно получает достаточно осадков для хорошего урожая, на каштановых почвах осадков зачастую недостаточно, более низкое содержание гумуса в нем снижает устойчивость к суровым условиям ведения сельского хозяйства.

Богатство чернозема было привлекательным на протяжении всей истории. С давних пор это хлебная корзина Европы и Северной Америки; сегодня на черноземах выращивают более половины пшеницы, продаваемой на международном рынке; Россия, Украина и Аргентина в настоящее время являются наиболее быстро растущими экспортерами.

Неудивительно, что именно чернозем стал предметом исследований В. В. Докучаева в самом начале научного изучения почвы. Книга «Русский чернозем», опубликованная в 1883 году, является кратким изложением принципов новой науки. Он писал о Бельцкой степи: «Чернозем казался мне в 1877 году настолько типичным по глубине, структуре и увлажнению, что я назвал его „первоклассным“. Анализ показал, что содержание гумуса составляло 5,718%». Докучаев понял, что это был сам по себе мир, созданный корнями степных трав, которые постоянно отмирают и заменяются новыми; корневая система столь изобильная, что на ней существовали большие популяции слепышей (кротов), это далеко не мелкие животные, а кротовины, характерные для подпочвенного горизонта чернозема – это их заполненные норы. Водопрочная зернистая структура – твердые комочки разных размеров, в среднем, скажем, размером с горошину – обеспечивают отличные физические свойства для роста полевых культур. Сами комочки являются пористыми и содержат достаточное количество воды, доступной для корней. В то же время крупные поры между ними, вместе со старыми корневыми участками и вездесущими земляными червями, обеспечивают быструю инфильтрацию дождя и тающего снега и просачивание любой избыточной воды вглубь почвы. Таковы почвы, которые многолетние травы создают для себя. Качество и содержание гумуса делают их такими, какие они есть. Это обеспечивает необычайное биологическое разнообразие. Они содержат то, что когда-то казалось неисчерпаемым запасом питательных веществ для растений и поддерживает зернистую структуру, которая

обеспечивает проницаемость для воздуха, воды и корней, а также устойчивость к ветру и дождю и, в исключительной, но не безграничной степени, к их возделыванию.

Даже во времена Докучаева дерн разрушали на все большей и большей площади девственных лугов. В течение прошлого столетия, под натиском все более интенсивной индустриализации сельского хозяйства, черноземы претерпели глубокие, но в основном незамеченные изменения, с далеко идущими известными и неизвестными последствиями (рис. 01–03). Корень проблемы – замена многолетней растительности однолетними культурами. Каждый год мы обрабатываем их, разрушаем почву и начинаем заново, что обнажает почву до основания, способствует размножению сорняков, ускоряет разрушение гумуса и эрозию самой почвы (Crews и др., 2018). В настоящее время черноземы повсеместно потеряли от 20 до 70 процентов своего исходного содержания гумуса, а типичный чернозем, описанный В. В. Докучаевым, нигде не содержит более 3,8% гумуса.

Начиная с 1960-х годов, деградация ускорилась, поскольку земля подвергается воздействию все более мощных машин и сильнодействующих химических веществ – до такой степени, что земледелие на черноземах перестает быть устойчивым ни с экономической, ни с экологической, ни с социальной точек зрения. На рис. 03 представлены обобщенные данные 35-летних стандартизированных ежедневных спутниковых измерений нормализованного индекса разности растительности – индекса зелености (NDVI), который представляет собой фотосинтетическую способность растительного покрова. За этот период в степях произошел самый серьезный и обширный упадок продуктивности на Земле, особенно серьезный из-за ценности почвы. На рис. 04а, показывающем только европейский сектор, эти данные были переведены в тенденцию снижения чистой первичной производительности. Контраст с рис. 04, б, который показывает области значительного улучшения земель за тот же период, говорит о многом.

Невидимая потеря гумуса в конечном итоге вызывает катастрофический сдвиг к другой нестабильной экосистеме, которая в 1930-х годах подверглась памятной Пыльной буре (*Dust Bowl*) в американских и канадских прериях. Есть бесчисленные примеры того, что тот же самый процесс происходит и сегодня из-за парадигмы «Зеленой революции»: сильная зависимость от того, что когда-то было дешевым, а теперь – дорогостоящим, от невозобновляемых источников энергии и производных продуктов (минеральные азотные удобрения, пестициды, топливо для интенсивной обработки почвы).

Нельзя утверждать, что «Зеленая революция» накормила мир и сохранила продукты дешевыми. На рис. 05 показана тенденция неуклонного снижения реальных международных цен на продовольствие в течение более чем столетие, прерываемая резкими скачками цен. Только 15 процентов продовольствия продается на международном рынке (Aldaya, 2008), эффективность национальных рынков зависит от специфических местных факторов, но именно дешевые продукты питания являются политической необходимостью для правительств любых убеждений – как это было с политикой «хлеба и зрелищ» в Древнем Риме (Ювенал, 100AD) и, конечно же, до этого. В этих условиях фермерские хозяйства должны либо стать больше, либо выйти из борьбы за выживание, что напрямую влияет на устойчивость сельских общин. Помимо растущего размера хозяйств, дешевым продуктам

питания помогает и способствует то, что долгое время считалось усовершенствованием технологии: все более мощные машины, более эффективные удобрения и агрохимикаты, более эффективное орошение и новые сорта сельскохозяйственных культур, которые выигрывают от этой роскоши. Фермеры принимают цену, а не устанавливают ее, так как они втянуты в замкнутый круг с жестким бизнесом, более крупной и дорогостоящей техникой и большей зависимостью от удобрений и агрохимикатов.

И цены на продукты питания вводят в заблуждение. В случае большинства основных товаров цены на выходе из хозяйства (фермы) не отражают должным образом затраты на все производственные вложения. Они не включают все расходы, связанные с трудом сельскохозяйственных рабочих; они, конечно, не отражают экологических издержек по очистке природных экосистем, истощению почвенного плодородия и даже по разрушению самой почвы, по устранению последствий наводнений и засух, загрязнения пресной воды или изменению нашего все более непредсказуемого климата. Таким образом, экспортеры продуктов питания субсидируют импортеров продуктов питания. Импортеры получают эти продукты гораздо дешевле, чем их реальная стоимость; и цена, помноженная на постоянно растущее и требовательное население, переносится на почву. Цены на полках, действительно, отражают большую часть затрат на ресурсы, находящиеся за пределами фермерских ворот, где продукты покупаются, обрабатываются и продаются в розницу; в этой части цепочки поставок создается около 90 процентов добавленной стоимости при предоставлении продуктов питания и связанных с ними услуг. Но даже эти цены не отражают последствий для здоровья населения при потреблении пищевых продуктов, не отвечающих стандартам; и при этом они не отражают затраты на оказание помощи занятым и безработным бедным в получении еды, которая все еще слишком дорога для них без субсидий.

Сельское хозяйство болеет и нуждается в терапии. Влияние методов ведения сельского хозяйства на глобальное потепление, на отклонение дождевых осадков от пополнения водных ресурсов к разрушительному стоку, а также загрязнение водотоков и подземных вод – все это насущные проблемы нашего поколения. Они будут сильнее давить на будущие поколения. Устойчивое развитие абсолютно необходимо, чтобы эти последствия и их причины были остановлены. Упрощенный подход к интенсификации, широко распространенный с 1950-х годов, является неустойчивым. Цены слишком низкие, стоимость слишком высокая. Мы выступаем за замену сломанной продовольственной системы агроэкологическим подходом, смоделированным на природных экосистемах. Некоторые аспекты этого подхода уже применяются фермерами по всему миру, но для стимулирования более разумной политики и управления нам необходимо более широкое общественное признание значения почв с точки зрения продовольственной и водной безопасности, биоразнообразия, изменения климата и культурной ценности чернозема для общества.

Моделирование является ценным инструментом. Динамические модели органического вещества почвы (ОВП) были разработаны в 1970-х и 1980-х годах (*Campbell and Paustian 2012*), их параметры откалиброваны для соответствия наблюдаемым изменениям в условиях контролируемой практики управления. Но всегда трудно применить их в конкретных случаях, когда начальное состояние ОВП неизвестно (будь то в равновесном состоянии или нет); трудно установить

размеры различных углеродных фракций, особенно тех, которые имеют низкий период оборота, или оценить фактическое поступление углерода из различных источников; и с обычным пренебрежением к типу почвы и условиям более глубоких слоев почвы. Кроме того, трудно применить любую модель почвы для разных водных ресурсов и урожайности. Вместо этого, в данной книге – «Земледелие на черноземах» – мы опираемся непосредственно на более чем столетние экспериментальные данные. Это служит напоминанием о ценности длительных полевых опытов и дает возможность читателям делать свои собственные интерпретации, которые могут отличаться от наших.

1. Новая парадигма устойчивой интенсификации земледелия на черноземах. Будучи лучшей пахотной землей в мире, она находится под наибольшим давлением

Жизнь на Земле, какой мы ее знаем, зависит от здоровой почвы, которую мы должны признать живой, а не просто питательной средой, куда надо добавлять воду и питательные вещества. Почва – это живая кожа Земли, связующее звено между атмосферой, литосферой, биосферой и гидросферой, но их хрупкий баланс все чаще нарушается деятельностью человека. Ущерб превзошел все ожидания. Наше внимание сосредоточено на регенерации и восстановлении почвы и почвенного плодородия. Это требует изменения мышления, чтобы придать новый импульс тому, что сэр Альберт Ховард (*Sir Albert Howard*), заимствуя у Будды, назвал «колесом жизни»: постоянно вращающийся цикл между производителями продукции (культурами, способными фиксировать солнечную энергию), потребителями – консументами (людьми и животными) и разложением – редуцентами (неизвестный или малоизученный мир почвы).

Чернозем формировался в степях и прериях под многолетней злаковой растительностью. Замена многолетней растительности однолетними культурами, сопровождаемая постоянной обработкой почвы и необоснованным использованием агрохимикатов, резко изменила жизнь почвы и все естественные процессы, которые от нее зависят. Нет никаких сомнений, что вначале современное сельское хозяйство увеличивало урожайность; но стремление к получению прибыли без учета реальных изменений в плодородии почв направило сельское хозяйство по неустойчивой траектории. Вместо того чтобы искать причины многих проблем, с которыми сталкивается современное земледелие (дефицит питательных веществ и воды, уплотнение почвы, поражение сорняками, вредителями и болезнями и т. д.), акцент был сделан на последствия, что, скорее, похоже на бег за поездом, на который никогда не сможешь сесть.

2. Уроки многолетних полевых опытов на черноземе

Критический обзор данных, полученных в длительных исследованиях в Европе и Северной Америке, показывает фундаментальную роль севооборота, обработки

почвы и удобрения в трансформации ОВП и, в конечном итоге, урожайности культур. Масса фактических данных указывает на то, что оптимальный результат может быть достигнут путем более тесной интеграции между культурами (включая многолетние бобовые и злаковые травы), нулевой или минимальной обработкой почвы и удобрением в рамках севооборота. Множество разнообразных проблем, с которыми сталкивается современное сельское хозяйство, вызвано пренебрежением к севообороту или его упрощением в направлении продолжающейся монокультуры. Эффект севооборота (реакция разных культур на севооборот) специфичен для каждого места, но постоянен: чем больше разнообразие культур в севообороте, тем меньше наблюдаемый эффект от внесенных удобрений. Это потому, что здоровье почвы контролирует здоровье корней; здоровая почва способствует развитию корневой системы, которая поглощает воду и питательные вещества из почвы, особенно из подпочвенного горизонта. В монокультуре или в упрощенном севообороте неспособность корневой системы поглощать воду и питательные вещества должна быть компенсирована более высокими дозами удобрения и орошением. По той же причине пестициды должны компенсировать более низкую конкурентоспособность культивируемых растений против сорняков, вредителей и болезней. Проще говоря, путем выбора соответствующих севооборотов мы можем облегчить, если не предотвратить, истощение почвы, засуху, эрозию почвы и зараженность сорняками, вредителями и болезнями.

В книге «Естественные законы земледелия», опубликованной в 1873 году, Юстус фон Либих (*Justus von Liebig*) отметил, что ни одно из обычных удобрений, будь то искусственное или натуральное, не может восстановить плодородие почвы без клевера. Более того, его Закон минимума гласит, что рост растений определяется не общими доступными ресурсами, а теми, которые в дефиците; достаточно изменить только один компонент системы земледелия, например севооборот, и ситуация может резко измениться. Это наблюдалось в длительном полевом опыте по изучению действия и взаимодействия чередования культур, различных систем обработки почвы и удобрения в Научно-исследовательском институте полевых культур *Selectia* в Бельцах, Молдова. Результаты данного и других полевых опытов подчеркивают преимущества использования севооборотов, включающих смесь многолетних бобовых и злаковых трав, а также сокращение обработки почвы и нормы внесения минеральных удобрений.

3. Сходство урожайности разных культур и продуктивности всего севооборота независимо от вида и частоты обработки почвы

Это особенно верно для севооборотов со смесью многолетних злаковых и бобовых растений. Экспериментальные данные указывают на преимущества в минимизации или исключении обработки почвы – с точки зрения времени, стоимости, состояния почвы и экологических услуг. Таким образом, существуют хорошие перспективы для Природоохранного сельского хозяйства (ПСХ), охватывающего нулевую (*no-till*) или безотвальную обработку почвы в сочетании с покровными культурами и мульчей в более разнообразном севообороте. Тем не менее, необ-

ходимы дальнейшие исследования, чтобы преодолеть барьеры, препятствующие принятию этой прогрессивной системы земледелия, уменьшить нынешнюю зависимость от предпосевного применения гербицидов и адаптировать приемы к местным условиям.

4. Плодородию почвы принадлежит большая доля в формировании урожайности растений

Об этом свидетельствуют данные различных многолетних полевых опытов с различными севооборотами и монокультурой, а также с различными системами удобрения. Доля плодородия почвы составляет 100% в формировании урожайности культур на удобренных участках; и чем больше разнообразие культур в севообороте, чем больше внесено навоза, тем меньше вклад минеральных удобрений в формирование урожайности и наоборот. В севообороте, включающем смесь многолетних бобовых и злаковых трав, вклад плодородия почвы в формировании урожайности таких культур, как озимая пшеница и кукуруза, может составлять 100% как на удобренных, так и на неудобренных участках. На делянках с внесением навоза дополнительное минеральное удобрение не оправдано как с точки зрения агрономии, так и с экономической точки зрения.

Таким образом, восстановление плодородия почв является ключевым моментом в достижении более устойчивой системы ведения сельского хозяйства – с меньшей зависимостью от промышленных вложений, таких как минеральные удобрения, пестициды, а также от топлива. Экспериментальные данные подтверждают различия между влиянием органических и минеральных удобрений на плодородие почвы и урожайность растений: минеральные удобрения могут повышать урожайность, но они не могут поддерживать плодородие почвы, органические удобрения могут делать и то, и другое. Интеграция сельскохозяйственных культур и домашнего скота в севооборот усиливает круговорот питательных веществ, воды и энергии.

5. Восстановление плодородия почвы путем секвестрации (связывания) углерода

Увеличение содержания гумуса в почве улучшает ее физические, химические и биологические свойства. Это повышает устойчивость почвы и системы земледелия в условиях изменения климата. Гумус может быть восстановлен за счет большего разнообразия сельскохозяйственных культур, включая культуры с более глубокими, более обильными корневыми системами, а также с ежегодным возвращением достаточного количества свежих органических остатков, поддержанием постоянного почвенного покрова растущих культур или мульчи из растительных остатков, а также посредством нулевой обработки почвы.

Так как чернозем утратил около 70 процентов своих исходных запасов ОВП, его потенциал для поглощения углерода очень велик. Мы оценили потенциальную

возможность черноземья России, Украины, Казахстана и Молдовы в снижении эффекта глобального потепления и в повышении продовольственной безопасности. Даже при сохранении почвы под пахотными культурами, вполне возможно сократить выбросы парниковых газов и даже фиксировать углерод из атмосферы для повышения плодородия почв и уменьшения зависимости от промышленных вложений и ископаемого топлива. Мы также подчеркиваем возможности для большей продовольственной и водной безопасности как на местном, так и на глобальном уровнях путем перехода от существующей разрушительной системы земледелия к более устойчивой системе ведения хозяйства.

Восстановленные почвы более высокого качества обеспечат улучшение предоставляемых экосистемных и социальных услуг. Экологическая перестройка систем земледелия укрепит сельские общины и улучшит состояние природных ресурсов и окружающей среды. Чернозем снова может стать мировой хлебной корзиной и в то же время – адаптироваться к глобальному потеплению и смягчать его последствия.

Список литературы

- Aldaya MM, AY Hoekstra and JA Allan 2008 *Strategic importance of green water in the international crop trade*. Value of Water Research Report 25, UNESCO-IHE, Delft
- Bai ZG, DL Dent, L Olsson and others 2015 A longer, closer look at land degradation. *Agriculture for Development* 24, 3-9
- Brooks J 2017 *Changing trade agendas and food security*. OECD Trade and Agriculture Directorate, Paris. www.agri-outlook.org
- Campbell EE and K Paustian 2015 Current developments in soil organic matter modelling and the expansion of model applications. A review. *Environmental Research Letters* 10, 1-36
- Crews TE, W Carton and L Olsson 2018 Is the future of agriculture perennial? Imperatives and opportunities to reinvent agriculture by shifting from annual monocultures to perennial polycultures. *Global Sustainability* <https://doi.org/10.1017/sus.2018.11>.
- Howard A 1943 *An agricultural testament*. Oxford University Press
- Juvenal c100AD *Satire X* in: *The sixteen satires*, edited by Peter Green, 3rd edition 1996, Penguin Classics
- Liebig J von. 1863. *The natural laws of husbandry*. English version edited by John Blyth, Walton and Maberly, London
- Докучаев В. В. Русский чернозем. Отчет Вольному экономическому обществу. СПб. 1883.

Содержание

Глава 1

ИЗМЕНЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПАРАДИГМЫ

1.1. Введение.....	2
1.2. Изменение парадигмы интенсификации земледелия	5
1.2.1. Необоснованная интенсификация сельского хозяйства и ее последствия	5
1.2.2. Интенсификация сельского хозяйства, основанная на использовании промышленных вложений (инпутов), и продовольственная безопасность	7
1.2.3. Экологические последствия индустриальной модели интенсификации сельского хозяйства	8
1.2.4. Социальные последствия необоснованных и чрезмерных промышленных вложений (инпутов).....	8
1.3. Целостный подход к менеджменту фермы: CNPK против NPK.....	9
1.3.1. Классическая агрономия и значение плодородия почвы	12
1.3.2. Питание почв против питания растений.....	14
1.4. Новая парадигма	15
1.5. Выводы.....	17
Список литературы	17

Глава 2

АГРОЭКОЛОГИЯ: НАУЧНАЯ ОСНОВА ДЛЯ УСТОЙЧИВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

2.1. Устойчивая интенсификация земледелия	21
2.1.1. Агроэкология	23
2.2. Природные экосистемы как модель для построения устойчивых агроэкосистем	24
2.3. Выводы.....	29
Список литературы	29

Глава 3

ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЕ, КАЧЕСТВО ПОЧВЫ И МЕНЕДЖМЕНТ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВЫ

3.1. Введение.....	32
3.2. Изменение землепользования и менеджмент почвы	34
3.3. Здоровье почвы и ее качество	38
3.4. Органическое вещество почвы и его трансформация в черноземах	42
3.5. Структура почвы – наиболее показательный индикатор плодородия черноземных почв	49
3.6. Заключение	52
Список литературы	52

Глава 4

СЕКВЕСТРАЦИЯ (СВЯЗЫВАНИЕ) УГЛЕРОДА И ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

4.1. Введение.....	57
4.2. Связывание углерода при различных методах ведения сельского хозяйства	60
4.2.1. Однолетние против многолетней растительности; <i>no-till</i> (без вспашки) против обычной обработки почвы	60
4.2.2. Севооборот и бессменные культуры	61
4.2.3. Верхний слой почвы против подпочвы; корни против надземной части.....	68
4.2.3. Удобрение.....	74
4.2.5. Орошение.....	79
4.2.6. Обработка почвы	83
4.3. Изменение климата.....	85
4.4. Выводы.....	89
Список литературы	90

Глава 5

СЕВООБОРОТ

5.1. Введение.....	94
5.2. Принципы построения севооборотов	96
5.2.1. Разнообразие сельскохозяйственных культур	96
5.2.2. Чередование культур с различной глубиной проникновения корневой системы	105
5.2.3. Восстановление органического вещества почвы.....	112

5.2.3.1. Бобовые культуры в севооборотах	113
5.2.3.2. Влияние севооборотов с бобовыми культурами на органическое вещество почвы	115
5.2.4. Предупреждение эрозии почвы и засухи	116
5.2.5. Повышение природной способности сельскохозяйственных культур и почв подавлять сорняки, вредителей и болезни, предотвращать истощение почвы	120
5.2.5.1. Больше разнообразие культур в севооборотах	120
5.2.5.2. Качество почвы	123
5.3. Выводы	124
Список литературы	125

Глава 6

ОБРАБОТКА ПОЧВЫ И КОНСЕРВАТИВНАЯ СИСТЕМА ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

6.1. Введение	130
6.2. Пахать или не пахать?	132
6.3. Урожайность и плодородие почв при отсутствии вспашки (<i>no-till</i>) и обычной обработке почвы	140
6.4. Роль растительных остатков при <i>no-till</i>	141
6.5. Консервативное земледелие	143
6.5.1. Извлеченные уроки	144
6.5.2. За и против (плюсы и минусы) консервативного земледелия	146
6.6. Контроль сорняков: отсутствие вспашки (<i>no-till</i>), агрохимикаты, биоразнообразие и здоровье общества	149
6.7. Выводы	152
Список литературы	153

Глава 7

ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВЫ, УДОБРЕНИЕ ПОЧВЫ И КРУГОВОРОТ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

7.1. Введение	158
7.2. Плодородие почвы и удобрение почвы	159
7.2.1. Потребление и сохранение почвенной воды в севооборотах	162
7.2.2. Урожайность растений на типичных черноземах при различных системах удобрения	169
7.2.3. Доля плодородия почв в формировании урожайности	175
7.3. Круговой оборот питательных веществ	178
7.3.1. Интеграция земледелия и животноводства	178
7.4. Выводы	183
Список литературы	185

Глава 8

ПОТЕНЦИАЛ ЧЕРНОЗЕМОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И СМЯГЧЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

8.1. Введение.....	189
8.2. Потенциал черноземов для повышения продовольственной безопасности и смягчения последствий глобального потепления.....	190
8.2.1. Потери и приrost органического углерода в почве под полевыми культурами	190
8.2.2. Потенциальные изменения в запасах ПОС и выбросы CO ₂	193
8.2.3. Продовольственная безопасность.....	197
8.3. Стратегическая поддержка более устойчивых систем ведения сельского хозяйства и сельских сообществ	198
8.4. Выводы.....	201
Список литературы	202

Глава 9

ПРОБЕЛЫ И ИХ ПРЕОДОЛЕНИЕ

9.1. Где мы сейчас находимся	205
9.2. Преодоление пробела	205

ИНДЕКС.....	210
-------------	-----

Авторы:

Борис Боинчан знает черноземные почвы. Сын степи, он провел свою профессиональную жизнь бок о бок с черноземьем. Он получил степень доктора habilitation сельскохозяйственных наук в Московской академии им. Тимирязева, и в течение многих лет руководил многолетними полевыми экспериментами в Научно-исследовательском институте полевых культур «Селекция» в Бельцкой степи в Молдове – изучал ту самую почву, которую Докучаев в 1887 году назвал «первым классом». Он возглавлял долгие годы институт и одновременно кафедру естествознания и агроэкологии в Государственном университете им. Алеку Руссо.

Научно-исследовательский институт полевых культур
«Селекция», Государственный университет им. Алеку Руссо,
Бельцы, Calea Eșilor, 28, 310,1 Бельцы, Республика Молдова

Дэвид Дент (*David Dent*) работал в области картирования почв, оценки земель и планирования землепользования на всех уровнях: на государственной службе, в качестве преподавателя в университете и в качестве консультанта международных организаций и частного сектора. Награжден юбилейной медалью к столетию Австралии за научную поддержку Национального плана действий по засолению и качеству воды. В последнее время возглавлял *ISRIC World Soil Information* в Вагенингене, Нидерланды. В настоящее время работает, находясь в своем фермерском доме в Норфолке.

Ферма Chestnut Tree Farm,
Форкент Энд, Норфолк NR16 1HT, Великобритания

Глава 1

ИЗМЕНЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПАРАДИГМЫ

Научное исследование происходит в контексте общего, принятого... (парадигма = нормальная наука), перемежаемого периодами истерии, из которых возникает новая парадигма – когда нормальная наука возобновляется.

Структура научных революций.
Томас Кун (Thomas Kuhn), 1962

Аннотация. Два гиганта XIX века, Докучаев и Либих, установили совершенно разные подходы к миру почвы: один в поле, другой в лаборатории. Идея Докучаева о почве как о независимом природном теле, развивающемся в свое время в соответствии со своими законами, находит отклик в гипотезе Гея Джеймса Лавлока (*James Lovelock's, Gaia hypothesis*). Известная теория минерального питания Либиха основывалась на анализе растений и почвы. Позднее он узнал больше, а его последователи – нет. Он также осознал связь между здоровьем почвы, экосистемой и здоровьем человека. За Либихом последовали Геккель (*Haeckel*) на рубеже веков, Ховард (*Howard*) в 1940-х годах и многие другие.

Политика требует дешевой еды: нет ничего дороже. После Второй мировой войны химическая промышленность перешла от боеприпасов к агрохимикатам, что стало ловким шагом и вывело на первый план удобрения и пестициды: «Зеленая революция» была порождена не только новыми сортами и гибридами сельскохозяйственных культур, но и дешевой энергией, химикатами и расширением орошения. Эта парадигма зависит от невозобновляемой ископаемой энергии до такой степени, что она расходует больше энергии, чем производит. Разложение органического вещества почвы, которое питает жизнь в почве и поддерживает ее структуру, делает возможным инфильтрацию осадков, водоснабжение растений и сток воды в ручьи и грунтовые воды. Потери органического вещества почвы не могут быть восполнены минеральными удобрениями, а только путем ежегодного возвращения достаточного количества свежих органических остатков и навоза.

Производство продовольствия распределяется неравномерно: большинство стран полагаются на импорт, а прогнозируемая численность населения в 2050 году потребует увеличения производства на 50–70 процентов. Цены на выходе из ферм вынужденно снижались, в то время как стоимость ресурсов возрастала. В результате возникли более крупные фермы, появилось больше машин с более высокой производительностью, применено необоснованное количество агрохимикатов с постепенной заменой ручного труда. Устойчивое развитие предполагает замену

этой изжившей себя системы новым системным подходом, имитирующим природные экосистемы, и включает: организацию ландшафта в соответствии с особенностями рельефа; минимальное нарушение почвы; сохранение растительных остатков сельскохозяйственных культур в виде мульчи на поверхности почвы; разнообразные севообороты; интеграцию растениеводства с животноводством; практическое применение результатов научных исследований во благо сельских общин.

Многолетние полевые опыты начались в Ротамстеде (*Rothamsted*) в 1843 году, за ними последовали другие, и кропотливые измерения подтверждают ущерб, нанесенный современными системами земледелия. Но другой способ ведения земледелия возник не из формальных экспериментов, а от самих фермеров. В 1943 году Фолкнер (*Faulkner*) осмелился противостоять вспашке, но начиная с 1970-х годов нулевая обработка почвы была внедрена фермерами в Бразилии в виде природоохранного сельского хозяйства (ПОСХ) как средство выживания. В настоящее время ПОСХ принято и используется более чем на 12% всех пахотных земель мира, но для преодоления барьеров по его дальнейшему продвижению понадобятся конструктивная политика и междисциплинарные исследования.

Ключевые слова: почва в полевых и в лабораторных условиях, экосистемные услуги, менеджмент (управление), состояние почвы, агрохимикаты, природоохранное сельское хозяйство, цены на продовольствие и цены на фермах, необоснованное использование промышленных вложений (инпутов), имитирование природных экосистем.

1.1. Введение

Ничем так не пренебрегают, ничто так недооценивается и так мало охраняется, как почва, но жизнь на Земле, как мы знаем, была бы невозможной без почвы. Сэр Альберт Ховард (*Albert Howard*), пионер органического земледелия, описал ее роль в книге «Колесо жизни» (*The Wheel of Life*): «Жизнь на Земле напрямую зависит от баланса между продуцентами – производителями (культурами, способными ассимилировать солнечную энергию), консументами – потребителями (людьми и животными) и редуцентами, разлагающими органику (неизвестный или малоизученный мир почвенной биоты)». Двигателем жизни является солнечная энергия, усваиваемая растениями посредством фотосинтеза. Эта первичная продукция потребляется животными. Как животный, так и растительный материал впоследствии разлагаются почвенными бактериями и грибами, обитающими преимущественно в почве. При этом почвенные организмы создают запас энергии и питательных веществ в форме органического вещества почвы (ОВП). Это не новая идея, но решающая роль почвенных микроорганизмов все больше осознается (*Lehman and Kleber*, 2015). Таким образом, вечное движение «колеса жизни» зависит от связи между ростом и распадом растений и животных, которые в то же время, управляют почвообразованием и плодородием почвы. ОВП – это не только топливо для жизни в почве; оно также связывает почвенные агрегаты, в частности, необыкновенную зернистую структуру чернозема, которая

способствует быстрому проникновению дождевой воды и тающего снега, обеспечивая накопление почвенной влаги. Любая сельскохозяйственная практика, которая разрушает физическую структуру почвы – например обработка почвы, – изменяет среду жизни в почве и таким образом нарушает баланс между минерализацией и синтезом органического вещества почвы и, следовательно стабильность, почвенной структуры.

Намного раньше В. В. Докучаев (это Дарвин в науке о почве, который, кажется, всегда был там, и написал это по-русски), воспринимал почвы, как отдельные природные тела: «четвертое царство природы», в союзе с минералами, растениями и животными; почвы ценнее золота, угля и нефти, потому что общества могут научиться заменять такие минеральные ресурсы, тогда как почва не может быть заменена (Докучаев, 1948). Такая концепция почвы была разработана его учеником и другом В. И. Вернадским, который описал ее как «биокосное вещество»: «Значение почвы в истории нашей планеты больше, чем кажется. Почва... определяет приток воды от осадков... таким образом, состав пресной воды напрямую определяется химией почвы». «На поверхности Земли нет другой силы в непрерывном развитии и, следовательно, более мощной по своим последствиям, чем живой организм почвы» (Вернадский, 1965, 1967). Эта идея почвы как независимого естественного тела, созданного в результате взаимодействия материнской породы, климата и живых организмов, но развивающегося в то же время в соответствии со своими законами, находит отклик в гипотезе Гея Джеймса Лавлока (Lovelock 1979, 1991). И вместе с Лавлоком мы должны спросить: «Если планетарная биосфера (или почва) – это живая система, хорошо ли это?»

Около 95 процентов нашей пищи производится почвой (ФАО, 2017, IAASTD, 2009). Более того, здоровая почва предоставляет экосистемные услуги, включая всю пресную воду, а также ряд социальных услуг. Нам не нужно идти с Вернадским до конца, чтобы понять, что почва – это гораздо больше, чем субстрат, в который нужно вносить удобрения и химикаты для получения нашего хлеба. Эрнст Геккель (*Ernst Haeckel*, 1900), основатель экологии, и сэр Альберт Ховард (*Albert Howard*, 1947) осознали связь между здоровьем почвы и экосистемы и здоровьем человека. Об этом нужно знать гораздо больше, но важность данного мира под нашими ногами мало осознается широкой общественностью и политиками. Наша цель – объяснить науку, стоящую за этим.

В славянских языках земледелие подразумевает создание почвы. Тридцать лет назад один из нас посетил академика Терентия Мальцева в Курганской области, за Уралом. Мальцев не имел ученой степени какого-либо сельскохозяйственного учебного заведения, но он обладал мудростью, понимал природу и ее роль в сельском хозяйстве и, столкнувшись с какой-либо критической проблемой, он сначала пытался найти ответ в поле. Борис (Боинчан, – примеч. ред.) рассказывает: «Я многому у него научился, но здесь я упомяну только две вещи. Во-первых, к сожалению, мы больше не создаем почву (земледелие), а, скорее, нацелены на урожай (урожаеделение), все наше внимание сосредоточено на урожайности и прибыли. Во-вторых, он рассказал мне о том, как научился кататься на велосипеде. При первой попытке он упал, так как смотрел под колесо. То же самое произошло при его повторной попытке. Соседка, наблюдая за его усилиями, посоветовала ему: «Терентий, ты должен смотреть прямо, а не под колесо!»

Размышляя об этом опыте, Мальцев прокомментировал: «Мы должны научиться вновь ездить на велосипеде в сельском хозяйстве».

Похоже, мы утратили стратегическое видение – перспективы развития при утилитарном отношении к почве. Избалованные дешевой энергией, мы проигнорировали ущерб, нанесенный окружающей среде и здоровью людей. Рыночная экономика пренебрегает такими отрицательными последствиями, но счет должен быть оплачен кем-то. В экологии существуют законы, которые должны соблюдаться. *Barry Commoner* в аллегорической форме сформулировал четыре закона в книге «Замкнутый круг» (*The Closing Circle*, 1971):

1. Все связано со всем остальным (все взаимосвязано).
2. Все должно куда-то уходить, или ничего не пропадает.
3. Природа знает лучше.
4. Не существует такого понятия, как бесплатный обед, в жизни за все надо платить.

Проще говоря, мы должны работать в гармонии с Природой, или платить цену. Эта цена уже выплачивается нами за то, что мы крадем у наших детей и внуков.

Индустриальный подход к интенсификации земледелия сосредоточен на том, что там, где выращиваются сельскохозяйственные культуры, необходимо добавлять воду и питательные вещества для получения более высоких урожаев при использовании новых или улучшенных сортов и гибридов. Если появляются вредители, болезни и сорняки, они должны быть уничтожены химическими веществами или механической обработкой почвы. Вместо выяснения причин их возникновения человек начал «бороться» с их последствиями. Это отношение восходит к истокам индустриального сельского хозяйства: молниеносному распространению теории минерального питания сельскохозяйственных культур Юстуса фон Либиха (*Justus von Liebig*, 1840). На основе химического анализа растений и навоза Либих предположил, что растения строят свое органическое вещество из воды и атмосферного углекислого газа, поглощая из почвы минеральные питательные вещества, такие как калий, фосфаты и нитраты. Таким образом, химический анализ сельскохозяйственных культур, по его мнению, позволит выявить любые питательные вещества, которые в дефиците – и дефицит можно восполнить, внося соответствующие минеральные соли в почву.

Джентльмен из английской деревни Джон Беннет Лейвс (*John Bennet Lawes*) унаследовал обанкротившееся имение, поэтому ему пришлось зарабатывать на жизнь. Это он сделал с большим успехом в партнерстве с химиком Джозефом Генри Жилбертом (*Joseph Henry Gilbert*). Они обнаружили, что обработка костной муки серной кислотой позволила получить быстродействующее фосфатное удобрение – суперфосфат, построили фабрику для удовлетворения растущего спроса на этот продукт, очистили поля битв в Европе, собирая это ужасное сырье, разбогатели и основали экспериментальную станцию Ротамстед (*Rothamsted*) в 1843 году. Их классические опыты продолжаются и сегодня; их ценность выше рубинов (*Lawes and Gilbert*, 1880–1893, *Powlson* и др. 2014), но, неизбежно, они были созданы новым и смелым мышлением зародившейся агрохимии, поддержаны полевыми опытами, заложенными на недавно созданных экспериментальных станциях, таких как Асков (*Askov*) в Дании в 1885 и Санборн (*Sanborn Field*) в университете

штата Миссури в 1888. Это не все. Научно-исследовательский институт полевых культур «Селекция» (*Selectia*) в Бельцах, Молдова, был создан в эпоху советского периода, чтобы удовлетворить насущную потребность в новых знаниях о полевых культурах и севооборотах после коллективизации, при значительном росте площадей под технические культуры, такие как подсолнечник и сахарная свекла, ускоренной эрозии почвы, а также сильной пораженности посевов сорняками, вредителями и болезнями (Либерштейн, 2014). Агрономические исследования в данном институте продолжаются в течение 60 лет; но с 1994 года появился новый агроэкологический центр с многофакторными опытами, сравнивающими урожайность культур и качество почвы при продолжающейся бессменной культуре и в севообороте, в севооборотах – с многолетними бобовыми травами и без них, со вспашкой, удобрениями и без них, а также с различными комбинациями навоза и минеральных удобрений. Мы остановимся на этих данных в следующих главах.

Как пояснил нобелевский лауреат Норман Борлауг (*Norman Borlaug*), «Зеленая революция» включала новые сорта сельскохозяйственных культур (такие как карликовые и полукарликовые сорта озимой пшеницы), интенсивную обработку почвы, более широкое применение минеральных удобрений, защиту посевов пестицидами и орошение. В период с 1961 по 2014 год урожай основных культур увеличился почти в четыре раза, но тенденция к росту выравнивалась, а урожайность в некоторых местах снизилась (UNEP, 2007; FAO, 2011). Лестер Браун в своей работе «Полная планета – пустые тарелки» увидел эту картину для большей части мира (*Lester Russel Brown*, 2012); то же самое было отмечено в длительных полевых опытах в Бельцах (*Boincean*, 2014). В то же время произошло ухудшение состояния почвы, окружающей среды и здоровья населения. Стало очевидным, что индустриальная модель интенсификации сельского хозяйства не является устойчивой с экономической, экологической и социальной точек зрения. Бизнес в той форме, как мы привыкли, также не будет работать в будущем (FAO, 2017, IAASTD, 2009); необходимо срочно пересмотреть преобладающую модель интенсификации сельского хозяйства, начиная с управления земельными и почвенными ресурсами.

1.2. Изменение парадигмы интенсификации земледелия

Современное сельское хозяйство сталкивается с экологическими, экономическими и социальными вызовами, которые следует честно признать и преодолеть. Мы можем сделать это только путем критической оценки существующей сельскохозяйственной практики, ее причин и следствий. Только таким образом мы можем поддержать переход к более устойчивой системе земледелия. Несколько сценариев описаны в следующих разделах.

1.2.1. Необоснованная интенсификация сельского хозяйства и ее последствия

Двадцатый век одобрил бескомпромиссное отношение к природе, возможно, благодаря покровителю сталинской революции, выраженное в словах И. В. Мичурина:

«Мы не можем ждать милостей от Природы, наша задача – взять их у нее». Неоспоримо, что после замены лошади произошел экспоненциальный рост применения моторизированной техники; отобрать милости у природы можно с помощью энергии полезных ископаемых – угля, нефти и природного газа. Но также, как каменный век закончился задолго до того, как человечество отошло от камня, эра углеродной цивилизации может закончиться задолго до того, как в мире закончится ископаемое топливо из-за тяжелых экологических последствий (*Rattan Lal*, 2007).

Мы можем извлечь большой урок на примере маленькой страны. Расчет количества солнечной энергии, накопленной на полях Молдовы под основными культурами (озимая пшеница, подсолнечник и сахарная свекла), по сравнению с энергией, потребляемой при выращивании этих культур с использованием ископаемого топлива и его производных (минеральные удобрения, пестициды, сельскохозяйственная техника и т. д.) показывает, что за период 1971–1980 гг. произошло увеличение накопленной энергии в урожае; впоследствии отмечено десятилетие равновесия; затем, с 1990 года – существенный дефицит (Боинчан, 1999). Завершающий этап сопровождался распадом СССР, который привел к радикальным последствиям для общества, но использование ископаемого топлива продолжало стремительно расти. Количество энергии, накопленной в процессе фотосинтеза, было больше потребляемой для выращивания сельскохозяйственных культур. Если мы также учтем энергию в некомпенсированных потерях органического вещества почвы (ОВП) в результате минерализации, то мы найдем приблизительное равновесие между энергией, накопленной в урожае и энергией, израсходованной на его формирование. Но реальные потери энергии от ОВП намного больше из-за эрозии почвы: как минимум в пять раз больше ОВП теряется в результате эрозии, чем при минерализации (Крупеников, 2008).

Проще говоря, земледелие потребляет больше энергии на формирование урожая, чем накапливает ее в урожае, а энергетическая стоимость каждой единицы произведенной продукции постоянно растет. Промышленные ресурсы (инпуты) производятся на заводах, с потреблением большого количества энергии. Большая часть этой энергии поступает из ископаемых источников энергии, а цены на энергоносители в течение полувека выросли, хотя и хаотично (рис. 1.1.). С учетом сегодняшних значений средняя цена на сырую нефть с 1946 года составляет 43 доллара за баррель; с 1980 года – 54 доллара за баррель; а с 2000 года – 63 доллара за баррель.

Как уже упоминалось, во многих странах поставки дешевого продовольствия поддерживаются сельскохозяйственными субсидиями; в противном случае разрыв между низкими и падающими ценами у фермерских хозяйств и растущими ценами на промышленные инпуты будет означать, что даже крупные фермы не могут себе позволить купить промышленные инпуты. Зависимость от промышленных инпутов, с одной стороны, и субсидий – с другой, делает сельское хозяйство неконкурентоспособным в рыночной экономике; фермерские хозяйства должны были стать больше, чтобы выжить или выйти из конкуренции (*Schumacher*, 1973), и это уменьшает способность выживания сельских общин.

Смит (*Smith*, 1991) проанализировал распределение прибыли между тремя секторами продовольственной системы в США в течение 20-го века, это были следующие

щие секторы: сам фермерский сектор, независимо от размера фермы и формы собственности на землю; производство средств производства (машин, минеральных удобрений, пестицидов и т. д.); сектор рынка (включая транспорт, переработку, хранение и розничную продажу), который связывает производителей и потребителей. Он нашел, что доля общей прибыли, полученной сельскохозяйственным сектором, сократилась с 41 процента в 1910 году до 9 процентов в 1990 году, в то время как промышленный сектор, ответственный за производство средств производства, увеличил свою долю с 15 процентов до 24 процентов, а рыночный сектор увеличил свою долю с 44 до 67 процентов. Эта тенденция продолжается, не ослабевает. В странах ОЕЭС (Организация европейского экономического сотрудничества) рыночный сектор в настоящее время занимает 90 процентов объема, вложенного в продовольственную систему; к 2000 году доля сельскохозяйственного сектора сократилась до 6 процентов; в 2008 году – только 3,3 процента (DEFRA, 2015, Евростат, 2009). В этих условиях трудно поддерживать население и сохранять инфраструктуру в сельских общинах. Небольшие фермы разоряются, побуждая людей переезжать в города или эмигрировать; урбанизация сопровождается миграцией под давлением нехватки природных ресурсов и, часто, конфликтов. Было бы лучше поддерживать сельские общины.

1.2.2. Интенсификация сельского хозяйства, основанная на использовании промышленных вложений (инпутов), и продовольственная безопасность

Интенсификация сельского хозяйства необходима, чтобы накормить и одеть растущее население. Проблема продовольственной безопасности заключается в следующем: при всех впечатляющих достижениях 1960-х и 70-х годов производство распределяется неравномерно – большинство стран полагаются на импорт продовольствия; более 800 миллионов человек ложатся спать голодными, почти столько же страдают ожирением, а 2 миллиарда страдают от дефицита питательных микроэлементов. Цели ООН в области устойчивого развития (2015 год) направлены на ликвидацию голода и недоедания к 2030 году. Помимо этого, прогнозируемый рост численности населения составит с 7,6 млрд человек в 2017 году до 9,8 млрд. К 2050 году (ООН, 2017) потребуется увеличение в мировом производстве продуктов питания на 50–70 процентов (ФАО, 2018). Это большой запрос.

Необходимость – мать изобретения: мы можем рассчитывать на то, что будут разработаны новые технологии. Даже при наличии современных технологий разрыв между потенциальным и фактическим производством составляет 30–60 процентов в развивающихся странах (Cassman и др., 1995); и потери могут быть уменьшены на каждом звене пищевой цепи, ФАО (2018) прогнозирует – на 30 процентов. Проблема в современных системах земледелия – это деградация земель, вызванная неправильным использованием почв и сельскохозяйственных культур. При обычном ведении бизнеса любое повышение производительности будет сдерживаться усилением деградации земель и глобальным потеплением (R. Lal, 2004, 2009). Как можно изменить эту тенденцию?

1.2.3. Экологические последствия индустриальной модели интенсификации сельского хозяйства

Необоснованные и зачастую чрезмерные производственные затраты привели к снижению биологического разнообразия и деградации почвы, воды и воздуха. Количество микроорганизмов в одной столовой ложке почвы того же порядка, что и народонаселение Земли (Doran и др., 1996), но только около 7% почвенных организмов было идентифицировано. Мы понятия не имеем, что они делают – не говоря уже о том, как они это делают, – за исключением того, что они поддерживают функции почвы, продуктивность, выполняют экологические услуги, такие как утилизация отходов, круговорот питательных веществ, снабжение пресной водой, способность почвы самовосстанавливаться... Вот почему так важно остановить деградацию почвы. Альдо Леопольд (Aldo Leopold, 1953) выразился так: «Если в течение веков биота создала что-то, что нам нравится, но мы его не понимаем, то, кто, кроме дурака, откажется от таких, казалось бы, бесполезных частей? Сохранять каждую шестерню и колесо – это первая мера предосторожности при интеллектуальной ковке».

В 1962 году книга «Безмолвная весна» (на русском языке издана в 1965 г.) Луиз Рашел Карсон (Rachel Carson, *Silent Spring*) повысила осведомленность людей о воздействии на окружающую среду необоснованного использования пестицидов. Она не могла представить, насколько широко они будут использованы в сельском хозяйстве сегодня! Около 85 процентов нашей пищи поступает только из 12 видов сельскохозяйственных культур. Такой узкий круг культур делает их уязвимыми для сорняков, вредителей, болезней и неблагоприятных погодных условий (Kirshenmann, 2010). Но вместо того чтобы бороться с причинами распространения сорняков, вредителей и болезней, фермерская практика пытается контролировать их последствия. Это только усугубило проблемы: несмотря на десятикратное увеличение использования пестицидов за последние двадцать лет, вредители и болезни забирают 20–40 процентов от потенциального производства (ФАО, 2018).

Произошла также видимая потеря разнообразия не только в сортах культурных растений, но и за счет упрощения севооборотов, иногда вплоть до непрерывной монокультуры. Разнообразие внутри севооборотов означает лучшее здоровье сельскохозяйственных культур и почвы: в главе 5 мы представим данные длительных полевых опытов о том, что чем больше разнообразие культур на полевом уровне, тем лучше функциональность почвы и, в долгосрочной перспективе, урожайность культур.

1.2.4. Социальные последствия необоснованных и чрезмерных промышленных вложений (инпутов)

Рыночная экономика опустошила сельские общины. Мы можем наблюдать уменьшение сельского населения в Европе и Северной Америке, а также в Австралии, где многие фермы действительно огромны. Современные сельскохозяйственные системы, которые зависят от мощной техники, потенциально опасных химикатов и большей производительности труда, помогли и способствовали бегству с земли и отделили производителей от потребителей. Деревни и небольшие поселки, города пустеют; крупные города и поселки вторгаются в прежние сель-

скохозяйственные угодья, водные ресурсы отводятся и загрязняются, выбросы парниковых газов увеличиваются, а внедрение генетически модифицированных культур усилило контроль транснациональных компаний за сельскохозяйственным производством.

Все эти последствия обсуждались на различных международных форумах. «Повестка дня ООН на период до 2030 года» (UN, 2015) включает в себя семнадцать задач в области устойчивого развития, в том числе: ликвидацию голода, снабжение чистой водой, разумное потребление и производство, а также обеспечение жизни на земле. Все они зависят от землепользования и управления, но уклоняются от основной проблемы управления пищевой цепочкой. Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН, 2016) объединяет все страны для борьбы с изменением климата и адаптации к его последствиям, с усилением поддержки бедных стран. Эти инициативы зависят от устойчивых систем ведения сельского хозяйства, которые потребуют как агрономических, так и социальных изменений – изменения мышления от упрощенного или редукционистского к целостному подходу.

1.3. Целостный подход к менеджменту фермы: CNPK против NPK

Вендел Берри (Wendell Berry, 1977) любил говорить: *“Farmers are people of experience but scientists are people of experiments – they are experts”* (Фермеры – люди опыта, а ученые – люди экспериментов – они эксперты). Ученые могут наблюдать и анализировать отдельный фактор, изолируя его вне его естественных условий, но слишком часто тот же фактор не наблюдается и не анализируется также и в условиях его естественного нахождения, где он находится в сложном взаимодействии, гармонии, а иногда – в противоречии со многими другими факторами. Взаимодействие между факторами может давать разные результаты в зависимости от условий, поэтому один и тот же результат не всегда получается при разных условиях. Если взять природу в качестве нашей модели, то мы с большей вероятностью достигнем устойчивого развития. И поскольку всестороннее знание естественной системы не может быть достигнуто в лаборатории, исследование в естественных условиях (на ферме) является хорошим вариантом – научная экспертиза может быть интегрирована с опытом фермеров.

Вендел Берри также повторял правило: все, что разделено, должно конкурировать. Конкуренция за ограниченные ресурсы усиливается путем разделения, например: производители и потребители продуктов питания, природа и технологии, города и села, животные и сельскохозяйственные культуры... Природа функционирует как сложная система, которая не может быть полностью воспроизведена технологией. Интеграция растениеводства и животноводства была основой наращивания плодородия почвы и остается ключом к ее восстановлению. Разделение и конкуренция между ними не заканчиваются в пользу той или иной стороны: это оставляет обе стороны беднее. Отделение людей от земли также имеет последствия: когда люди выращивали и одновременно потребляли продукты питания, они были привычны к качеству продуктов, выращенных их собственными руками; теперь это сложно выразить.

Жизнь полна противоречий. Образование почвы и ее плодородие являются следствием бесконечного взаимного обмена между синтезом (гумификацией) и разложением (минерализацией) ОВП. Различные условия окружающей среды определяют течение жизни в почве, но естественная растительность и возделываемые культуры приобретают особое значение в любое время и в любом месте, потому что другими факторами формирования почвы (материнская порода, рельеф, климат и погодные условия) трудно манипулировать. Как писал академик И. А. Крупеников с соавторами (2011), замена многолетней растительности чернозема однолетней растительностью оказало непосредственное влияние на обилие и глубину проникновения корневой системы. При благоприятных климатических условиях постоянное отмирание и возобновление корней многолетних трав создавало запасы ОВП, но оно значительно истощается под однолетними растениями. В следующих главах мы представим данные о благоприятном воздействии на ОВП севооборотов, которые включают многолетние бобовые, а также влияние многолетних трав на запасы почвенной воды, особенно в условиях засухи.

Разрушение дерна было вознаграждено хорошей урожайностью (*Albrecht*, 1938; Костычев, 1949; Вильямс, 1950). Урожайность поддерживалась, даже увеличивалась, благодаря усилиям по интенсификации современного сельского хозяйства, но высокие урожаи маскируют реальное состояние плодородия почвы. В 1933 году *Jenny* подсчитал, что черная земля – чернозем – в Миссури потеряла более трети своего исходного запаса гумуса за 60 лет отвальной обработки почвы; та же самая картина вырисовывается из систематического обзора опубликованных исследований по изменению ОВП в Канаде, который показал потерю 17–58 процентов (в среднем 30 процентов) чернозема после распашки черных почв (*Vanden Bogaart* и др. 2003). В таблице 1.1 обобщены данные Ковды (1983 г.) о снижении ОВП в российском черноземе в течение столетия под отвальной вспашкой.

У нас нет более свежих сопоставимых данных, но все указывает на то, что потеря гумуса продолжается. Народная мудрость утверждает, что будет достигнуто новое равновесие, но пока нет никаких его признаков.

Проблемой являются не только или даже большей частью не питательные вещества почвы – они могут быть восполнены удобрениями. Проблема заключается в сочетании сорняков, вредителей, болезней, усталости почвы и потери способности почвы к восстановлению почвенного плодородия. Выпаханные почвы могут содержать не меньше питательных веществ, чем целинные, но их продуктивность снижается из-за поражения сорняками и болезнями, и потери способности накапливать воду и снабжать ею растения из-за ухудшения структуры почвы (Соколовский, 1956). В уплотненной почве может быть достаточно питательных веществ, но сельскохозяйственные культуры не могут их усваивать из-за неспособности корней проникать в почву; это требует дополнительных обработок почвы и более высоких норм минеральных удобрений, которые, в свою очередь, увеличивают поражение сорняками, вредителями и болезнями. В кислых почвах бобовые не могут усваивать азот, что, опять же, создает потребность в большем количестве удобрений... Существует длинный список проблем, но всегда есть тесная взаимосвязь между качеством почвы (физическими, химическими и биологическими свойствами) и продуктивностью культур. Без определения причин каждой проблемы мы долго будем устранять последствия. Это дорого, но, улучшая качество почвы, мы можем создать лучшие условия для роста и развития сельскохозяйственных культур.

Таблица 1.1. Изменение содержания и запасов гумуса в слое черноземной почвы 0–30 см в европейской части СССР за 100 лет

Подтип чернозема	Регион	1881 гумус, % по массе	т/га	1981 гумус, % по массе	Т/га	Потери гумуса за 100 лет, т/га	Средняя потеря, т/га	Потери гумуса, % к начальному уровню
Типичный	Тамбов, Воронеж	10-13	300-390	7-10	210-300	90	0.9	23-30
	Курск, Харьков	7-10	221-315	4-7	142-248	67-79	0.7-0.8	21-36
	Самара	13-16	290-480	8-10	240-300	150-180	1.5-1.8	38-39
Выщелоченный	Ставрополь	7-10	231-330	4-7	150-263	67-81	0.7-0.8	20-34
	Ульяновск	13-16	390-480	4-7	120-210	270	2.7	56-69
Обыкновенный	Воронеж	7-10	221-315	4-7	150-263	52-71	0.5-0.7	17-32
	Молдова	4-7	126-221	2-4	75-150	51-71	0.5-0.7	32-40
	Оренбург	9-11	270-330	6-8	180-240	90	0.9	27-33

1.3.1. Классическая агрономия и значение плодородия почвы

В. Р. Вильямс (1950) писал, что урожайность культур определяется космическими и земными факторами. Космические факторы находятся вне нашего контроля, но мы можем воздействовать на земные факторы посредством земледелия, особенно путем поддержания доступности воды и питательных веществ, которые, в свою очередь, определяются биологией почвы. ОВП является источником энергии для почвенной биоты, поэтому логично отстаивать не только удобрение NPK, но и удобрение CNPK. Это не новая идея. Ю. Либих в «Естественных законах земледелия» (1865) писал: «Нет такой профессии, которая для своей успешной практики требует больших знаний, чем сельское хозяйство, и нет другой такой области знаний, в которой больше реального невежества». Он признавал, что в своей ранней работе по минеральному питанию переоценил важность NPK и уделял слишком мало внимания восстановлению энергии, извлекаемой из почвы для формирования урожая. Он убедился, что плодородие почвы может быть восстановлено только с помощью навоза, и, кроме того, считал недопустимым судить по результатам лабораторных анализов о реальном состоянии плодородия почвы – поразительный вывод такого человека. Зерновые культуры могут использовать воду и питательные вещества только в том случае, если корни способны усваивать их. Поэтому здоровые культуры предпочтительнее, чем обильные запасы питательных веществ из минеральных удобрений. Либих отверг поиски Лейвса (*Lawes*) и Гилберта (*Gilbert*) относительно такого удобрения, «которое могло бы помочь восстановить первоначальную продуктивную силу почв». Нет такого удобрения. Его собственное запатентованное удобрение на практике не оправдалось, и он не мог найти прямой связи между количеством азота в почве и урожайностью. Урожайность определяется многими другими факторами. Под конец он посчитал сорняки лучшим источником полезной информации, чем множество справочников.

Мы также считаем, что упор на урожайность без учета реального состояния плодородия почв, вводит в заблуждение. Тем не менее, тенденции в урожайности могут указывать, и они действительно указывают на некоторые важные ошибки в менеджменте хозяйств. Например, в работе «Как высохла наша степь», написанной в 1880-х годах, А. А. Измаильский отметил, что запасы воды почвы определяются не только количеством осадков, но и покрытием почвы живой растительностью или мульчей, а также структурой почвы. Он высказался за улучшение физических свойств почвы, что занимает больше времени, чем простое внесение минеральных удобрений; теория минерального питания Либиха получила признание, потому что реакция на урожай от минеральных удобрений незамедлительна, и мы привыкли к мгновенному эффекту, но это не равнозначно тому, как формируются почвы и их плодородие. В этот же период черноземы изучал другой известный русский ученый – П. А. Костычев. Костычев и Измаильский выступали за глубокую вспашку почвы с помощью отвального плуга; по их мнению, корнеплоды лучше обеспечены водой в глубоко вспаханных почвах.

Идеи Измаильского, Костычева, Тимирязева и Вильямса были использованы для составления так называемого Сталинского плана преобразования природы, принятого Советом Министров СССР 20 октября 1948 года, который включал

полезащитные лесные полосы, севообороты с многолетними бобовыми растениями, а также строительство прудов и водохранилищ в степной зоне европейской части СССР – 120 миллионов гектаров, что соответствует общей территории Англии, Франции, Италии, Бельгии и Нидерландов. Увы, реализация плана и повсеместное его внедрение были обусловлены политическими, экономическими и промышленными интересами, а не законами агрономии, биологии и почвоведения. Вместо гармонизации с этими законами предпринятые действия часто становились несовместимыми с ними. Возьмем один пример из многих. Профессор А. Чаянов, экономист, работавший в кабинете министров Ленина (Ульянова), хорошо понимал необходимость восстановления плодородия почвы. Он утверждал, что размер сельскохозяйственного предприятия должен быть определен путем оптимизации расходов при транспортировке навоза; он подсчитал, что транспортировка навоза на расстояния более 5 км не обоснована с экономической точки зрения, в таком случае дешевле равномерно распределить коров по территории фермы (А. Чаянов, 1924). Несмотря на ход истории и в жестких условиях экономики, основанной на контроле и командовании, он продвигал идею рыночной экономики. Он был также пионером сельскохозяйственных кооперативов и защищал социальную экономику, где множество мелких частных хозяйств объединяют свои земельные наделы, чтобы обеспечить себя едой и в то же время восстановить почвенное плодородие. Он был казнен как враг народа.

В конечном итоге без учета истинного положения вещей, сельскохозяйственные предприятия приобретали все большие и большие размеры, возрастала эффективность работы тракторов и другой сельскохозяйственной техники (ее тоже становились все больше и больше). Применение отвальной вспашки стало обязательным. Специализация и концентрация разделили земледелие и животноводство. Последствия оказались плачевными, и не только в СССР. Экологические и социальные последствия исторических событий включают в себя и череду сильнейших пыльных бурь – явление, вошедшее в историю как Пыльный котел, или Пыльная чаша (*the Dust Bowl*), американского Среднего Запада, ярко и правдиво описанное Джоном Стейнбеком (*John Steinbeck*, 1939) в книге *The Grapes of Wrath* («Гроздья гнева»), и голод миллионов людей в Украине в 1932–33 гг., вошедший в историю как Голодомор. Итогом политики Хрущева по началу освоения целинных земель в 1954 году стала еще одна «пыльная буря», когда было решено 13 миллионов гектаров каштановых земель, родственных сухим черноземным почвам, подвергнуть интенсивной распашке. Отсутствие севооборота должно было компенсироваться минеральными удобрениями, но никогда не удавалось построить достаточно заводов по производству минеральных удобрений – и химические удобрения никогда не могли поддерживать хрупкую структуру почвы. Ситуация ухудшилась после распада СССР. С приватизацией земли структура посевных площадей полностью изменилась. Животноводство практически исчезло вместе с кормовыми культурами в севообороте. В настоящее время участки земли обрабатываются на условиях краткосрочной аренды; основная цель – максимизировать прибыль; почва оставлена на произвол судьбы.

Здесь стоит вернуться к В. В. Докучаеву. Его книга «Наши степи прежде и теперь» была написана как ответ на засуху 1892 года, которую он приписал значительному расширению пахотных земель за счет лесов, лугов и прудов. Почва,

лишенная мульчи, больше не была защищена природой от стихии и утратила зернистую структуру, которая обеспечивала быстрое проникновение дождя и талой воды, способствовала усилению устойчивости перед лицом разрушительной силы воды и ветра (Докучаев, 1949). В. В. Докучаев утверждал, что черноземы нуждаются не столько в химизации, сколько в «физииции»: эрозия почвы и засуха являются двумя сторонами одной медали – обе они вызваны деградацией верхнего слоя почвы; и он разработал план по созданию защитных лесополос, прудов и водоемов на всей территории европейской части России, который выглядит почти так же, как сталинский план преобразования природы.

В. В. Докучаев подчеркнул важность целостного подхода к изучению природы – почва, климат, растительность и вода должны быть исследованы вместе, в тесной взаимосвязи. В книге «Русский чернозем» (1883) он писал, что человечество добилось больших успехов в изучении природы, но потеряло почву, разделив исследования горных пород, растительности, животных, минералов, воды, почвы и т. д. на различные дисциплины, не изучая взаимосвязи и интеграции между царствами растений, животных и минералов, с одной стороны, и людьми, даже с их духовной жизнью, с другой стороны. Он сравнил чернозем с лошадью, истощенной в результате переутомления и неадекватного кормления и, таким образом, склонной к болезням и травмам, которые не должны происходить. Сегодня это еще более актуально: телегу ставят перед лошадью, а кормление лошади совершенно забыто – за это никто не несет особой ответственности.

1.3.2. Питание почв против питания растений

Данные, представленные в главе 7, демонстрируют роль качества почвы в определении урожайности и параметров урожая. Простые расчеты показывают, что урожайность в 4 тонны/га озимой пшеницы выносит с зерном и соломой 120 кг/га азота. Многолетние полевые эксперименты на типичном черноземе в Бельцах свидетельствуют об оптимальной дозе внесения азота с минеральными удобрениями в количестве 60 кг/га. Эффективность использования N из внесенных азотных удобрений за 40 лет составляет 36–38% (Boincean and others, 2014). Даже в хороший год с эффективностью в 50%, только 30 кг/га используется культурой: оставшиеся 90 кг/га (120 – 30 кг/га), используемые культурой, должны быть взяты из почвы, поэтому нам нужно кормить почву, чтобы накормить растение и получить урожай. При среднем соотношении C:N, равном 10:1, количество ОВП, которое должно минерализоваться, чтобы получить 4 тонны/га озимой пшеницы, эквивалентно 900 кг/га. Даже если достаточное количество азота добавляется с минеральными удобрениями, почвенным микроорганизмам требуется энергия из растительных остатков, соломы и навоза для восполнения минерализационных потерь ОВП. Эти результаты согласуются с результатами одного из старейших многолетних полевых опытов с кукурузой, выращенной в монокультуре и в различных севооборотах в *Morrow* в Иллинойсе, США (см. главу 5). В течение 40–50 лет эксперимента количество N, поставляемого синтетическими удобрениями, превышало количество вынесенного азота с зерном на 60–190%, однако уровень снижения ОВП был даже выше для почвенного C в се-

вообороте, чем в монокультуре, потери С и N были даже больше в подпочвенном слое, чем в пахотном горизонте (Mulvaney и др. 2009).

Уильям Альбрехт (William Albrecht, 1938) в своей книге *Soils and Men* («Почва и люди») писал: «Используя только азот из минеральных удобрений, без добавления дополнительного источника свежего органического вещества, мы можем только разрушить органическое вещество почвы». Данные многолетнего полевого эксперимента с различными системами внесения удобрений в севообороте на типичном черноземе в Бельцах подтверждают гипотезу Альбрехта: количественные изменения трансформируются в резкие изменения качества почвы, поскольку ОВП становится менее ценным для питания растений, для образования структуры почвы и ее функциональности. Нисходящую спираль можно повернуть вспять только путем смены парадигмы на системное (целостное) использование природных ресурсов, включая: 1) чередование культур, 2) системы для предпосевной обработки почвы и 3) удобрение почвы в севообороте для достижения желаемого урожая и улучшения качества почвы. Урожайность и качество почвы одинаково важны – переоценка одного или другого является залогом неудачи.

1.4. Новая парадигма

Помня о пыльных бурях, которые охватили Великие равнины США и Канады в 1930-х годах, были разработаны меры по сохранению почв, чтобы контролировать эрозионный сток и в то же время позволить фермерам продолжить практиковать такие приемы, как террасы, контурное возделывание культур, залужение водных протоков и др. Но эти механические меры по сохранению почв никогда не были популярны, потому что их первоначальная стоимость и необходимость постоянного обновления не окупаются, по крайней мере, в краткосрочной перспективе. Кроме того, они не имеют непосредственного отношения к основной причине эрозии – потере структуры почвы и ее водопроницаемости, которые вызывают разрушительную силу эрозии.

Сила дождевых капель, способствующая удалению частиц почвы, и защита, обеспечиваемая почвенным покровом, были признаны в 1930-х годах, но использование этих находок не находило широкого применения на протяжении более 40 лет. Радикальное понимание пришло от Эдварда Фолкнера (Edward Faulkner, 1943), который бросил вызов парадигме о том, что обработка почвы – это хорошо. Он пришел к выводу, что общепринятый прием возделывания почвы был необоснованным: вспашка ускоряет окисление гумуса и обнажает почву для прямого воздействия солнца, ветра и дождя. Непосредственный ущерб при этом наносится жизни и структуре почвы. А разрушение структуры почвы означает меньшую инфильтрацию воды, больший эрозионный сток и вероятное удаление оставшегося верхнего слоя почвы облаком пыли. Но, несмотря на его новаторские усилия по замене посева в дернину на посев в узкую полосу, подготовленную чизельным плугом, его система минимальной обработки почвы не завоевала популярность.

Основной целью вспашки является уничтожение сорняков. Изобретение высушивающих гербицидов (паракват в 1961 году, глифосат – десять лет спустя)

сделала беспашотное земледелие (*no-till*) жизнеспособным. В это время фермеры на юге Бразилии страдали от разрушительной эрозии почвы. Для них, и в следующем десятилетии для пионеров *no-till* в тропическом Серрадо, принятие *no-till* было вопросом выживания: заслон эрозии почвы, упрощение операций по уходу за растениями при более низких производственных затратах, уменьшение затрат на приобретение сельскохозяйственной техники, больше дней для посева, более высокая устойчивость к засухе, как правило – более высокая урожайность, и, что не менее важно, сокращение человеко-часов почти на 70 процентов, что высвободило время для других видов деятельности. Всего за год при новом режиме ведения хозяйства покрытие почвы и ее структура увеличились, эрозия прекратилась, рентабельность фермерских хозяйств повысилась, а также улучшились водоснабжение и качество воды для местных сообществ.

Сами фермеры стали апостолами новой технологии. Их новаторский опыт был собран и сформулирован Джоном Ландерсом в книге «Руководство по нулевой обработке почвы» (*John Landers. The zero-tillage manual*, 1994), затем выкристаллизовался в Мадридской декларации первого Всемирного конгресса по консервативной системе земледелия в 2001 году: (1) исправить серьезные ограничения – особенно необходимо разрушить плужную подпочвенную подошву, чтобы облегчить инфильтрацию и хранение дождевой воды, после чего необходимость в обработке почвы отпадает; (2) сохранить остатки сельскохозяйственных культур на поверхности почвы (а не сжигать их), чтобы обеспечить проницаемый буфер против разрушительной силы дождевых капель, а также источник энергии и питательных веществ для почвенных организмов, которые создают структуру почвы; (3) прямой посев в мульчу для обеспечения минимального нарушения покрытия почвы; и (4) диверсификация севооборотов для предотвращения накопления сорняков, вредителей и болезней с предпосевным внесением гербицида, не загрязняющего окружающую среду, при необходимости.

Здесь мы представляем элементы новой парадигмы, которая стремится предотвратить проблемы, с которыми сталкивается современное сельское хозяйство посредством следующих мер:

1. Организация территории на ландшафтной основе в зависимости от уклона земли и создание целостной сети защитных лесополос, прудов и водоемов.
2. Принятие севооборотов с большим разнообразием основных и промежуточных культур.
3. Интеграция земледелия и животноводства для лучшего круговорота питательных веществ, воды и энергии.
4. Принятие консервативной системы земледелия на основе наименьшего нарушения почвы, удержания растительных остатков на поверхности почвы в виде мульчи, севооборота с большим разнообразием культур и комплексного управления питательными веществами, которые способны выполнять многие функции природных экосистем.
5. Внедрение достижений науки в жизнь в интересах сельских общин.

1.5. Выводы

1. Требуется много времени для восстановления плодородия почвы, и гораздо больше – для создания новой почвы. Почва в масштабе продолжительности человеческой жизни не возобновляется и истощается хищными методами ведения сельского хозяйства. Устойчивость даже чернозема находится под угрозой: необходимо восстановить запасы энергии в почве путем одобрения и внедрения устойчивых систем земледелия.
2. Нынешнюю модель интенсификации сельского хозяйства, основанную на необоснованном и чрезмерном использовании промышленных вложений (инпутов), необходимо пересмотреть, чтобы перейти к более устойчивой системе ведения сельского хозяйства. Нужно не столько технологическое преобразование, сколько системные трансформационные изменения: в частности, упрощенный менеджмент фермерским хозяйством должен быть заменен целостным, системным подходом. Модернизация технологии должна рассматриваться в рамках севооборотов с гораздо большим разнообразием основных и промежуточных культур, с меньшим количеством используемых промышленных инпутов и меньшим нарушением почвы.
3. Решающее значение для устойчивого развития имеет качество почвы, определяющее плодородие почвы, ее здоровье и функциональность. Этого нельзя достичь без ежегодного возвращения достаточного количества энергии в почву в виде свежих органических остатков и навоза.
4. Сама почва может быть сохранена только путем защиты ее от стихийных факторов природы и создания ее собственных ресурсов и средств защиты практически аналогично естественным экосистемам.

Список литературы

- Albrecht WA, 1938. Loss of soil organic matter and its restoration. 347-360 in *Soils and Men*. Yearbook of Agriculture 1938. US Dept Agriculture, Washington DC
- Berry W, 1977. *Unsettling of America. Culture and agriculture*. Avon Books, New York
- Boincean BP, 2014. Fifty years of field experiments with crop rotations and continuous cultures at the Selectia Research Institute of Field Crops. 175-200 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht
- Boincean BP, LT Nica and SS Stadnic, 2014. Productivity and fertility of the Balti chernozem under crop rotation with different systems of fertilization. 209-232 in DL Dent (editor) *Soil as World Heritage*. Springer, Dordrecht
- Brown LR 2012 *Full planet, empty plates: the new geopolitics of food scarcity*. WW Norton and Company, New York
- Brown LR 1996 *State of the world 1996*. Worldwatch Institute, New York
- Carson R 1962 *Silent Spring*. Houghton Mifflin, Boston MA
- Cassman KG and RR Harwood 1995. The nature of agricultural systems: food security and environmental balance. *Food Policy* 20, 5, 439-454
- Cayanov A 1924 *The optimal size of farms*. Second edition. New Village, Moscow (Russian)
- Commoner B 1971 *The closing circle: nature, man and technology*. Random House, New York

- DEFRA 2015 Annual business survey of the UK Organisation of National Statistics and Aggregate Agricultural Accounts. Dept of Environment, Food and Rural Affairs, London
- Docuchaev V.V. 1883 Русский чернозем. Независимое экономическое общество, Санкт-Петербург; 1952. Russian chernozem. The report of the Independent Economics Society, second edition with foreword by VR Williams. State Publisher for Agricultural Literature, Moscow. (English translation 1967 Israeli Program for Scientific Translations, Jerusalem)
- Doran JW, M Serrantonio and MA Liebig 1996 Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy* 56, 1-54 Eurostat 2009 Dynamics of the food supply chain. European Commission, Brussels
- FAO 2011 The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Earthscan, London
- FAO 2017 The Future of food and agriculture. Trends and challenges. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome
- FAO 2018 The State of Food Security and Nutrition in the World. Food and Agriculture Organisation of the UN, Rome <http://www.fao.org/publications/flagships/en/>
- Faulkner E 1943 Plowman's folly. Grosset and Dunlap, Norman OK
- Haeckel E 1900 The riddle of the universe. Harper & Brothers, New York (In German, Die Weiräthsel. E Strauß, Bonn, 1899)
- Howard Sir A 1943 An agricultural testament. Oxford University Press
- Howard Sir A 1947 The soil and health. Devin-Adair, New York
- IAASTD 2009 Agriculture at a crossroads. Edited by BD McIntyre and others. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development. The World Bank, Washington DC
- Jenny H 1933 Soil fertility losses under Missouri conditions. Missouri Agricultural Experimental Station Research Bulletin 324, Columbia MO
- Kirshenmann F 2010 Cultivating an ecological conscience. Essays from a farmer philosopher. Edited by CL Falk, Counterpoint Press, Berkeley CA.
- Krupenikov IA, BP Boincean and DL Dent 2011 The Black Earth. Ecological principles for sustainable agriculture on Chernozem soils. Springer, Dordrecht
- Lal R 2004 Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 204, 1623-1628
- Lal R 2007 Soil science and the carbon civilization. *Soil Science Society of America Journal* 71, 1095-1108
- Lal R 2009 Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Security* 1, 45-57
- Landers JN (editor) 1994 Fascículo de experiências de plantio direto no Cerrado (Zero-tillage manual). APDC, Goiânia (Portuguese)
- Lawes JB and JH Gilbert 1880-1893 The Rothamsted memoirs on agricultural chemistry and physiology, Volumes 1-3, from Philosophical Transactions of the Royal Society of London 1861-1883. William Clowes and Sons, London
- Lehman J and M Kleber 2015 The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 529, 60-68
- Leopold A 1953 The journals of Aldo Leopold. Oxford University Press, New York
- Liebig J von 1840 Organic chemistry in its application to agriculture and physiology. Edited by Lyon Playfair, Taylor and Walton, London
- Liebig J von 1863 The natural laws of husbandry. Edited by John Blyth, Walton and Maberly, London
- Libershteyn J 2014 The beginnings of long-term field trials on crop rotations at Balti. 171-174 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht
- Lovelock JE 1979 Gaia: a new look at life on Earth. Oxford University Press
- Lovelock JE 1991 Gaia: the practical science of planetary medicine. Gaia Books Ltd., London
- Madrid Declaration 2001 Declaration of the First World Congress on Conservation Agriculture, 1-5 July 2001. Madrid
- Mulvaney RL, SA Khan and TR Ellsworth 2009 Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: A global dilemma for sustainable cereal production. *Journal of Environmental Quality* 38, 2295-2314
- Pimentel D, M Whitecraft, ZR Scott and others 2010 Will limited land water and energy control human population numbers in the future? Springer Science and Business Media LLC
- Powlson DS, AJ MacDonald and PR Poulton 2014 The continuing value of long-term field experiments: insights for achieving food security and environmental integrity. 131-158 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht

- Schumacher EF 1973/1989 *Small is beautiful. Economics as if people mattered*. Bland and Briggs/Harper Collins, London
- Smith S 1991 *Is there farming in agriculture's future? The impact of biotechnology*. College of Agriculture and Life Sciences lecture series, November 14. University of Vermont and State Agricultural College, Burlington VT
- Steinbeck J 1939 *The Grapes of Wrath*. Viking Publishing – James Lloyd, New York
- United Nations 2015 *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. Adopted 13 July 2015
- UN DESA 2015 *World population prospects, the 2015 revision* www.un.org/en/development/desa/news/world-population-prospects-2015revision/http
- UNEP 2007 *Global environmental outlook GEO4*. Chapter 3, Land. UN Environmental Program, Nairobi
- UNFCCC 2016 *Paris agreement*, adopted 4 November 2016
- Vanden Bygaart AJ, EG Gregorich and DA Angers 2003 *Influence of agricultural management on soil organic carbon: A compendium and assessment of Canadian studies*. Canadian Journal of Soil Science 83, 363-380
- Боинчан Б.П. Экологическое земледелие в Республике Молдова (Севообороты и органическое вещество). Кишинев: Штиинца, 1999. 299 с.
- Вернадский В. И. Химический состав биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965.
- Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и её окружения, М.: Наука, 2001 г.
- Вернадский В. Биосфера (избранные труды по биогеохимии). М.: Мысль, 1967. 376 с.
- Вильямс В.Р. Избранные труды, тома 5-10. М.: Государственное издательство сельско-хозяйственной литературы, 1950-1952.
- Докучаев В.В. Избранные труды. т. 1. М.: ОГИЗ, Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1948.
- Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь. 1892 г. // Собрание сочинений. Под редакцией и с предисловием В. Р. Вильямса, З.С. Филипповича. М.- Л.: Сельхозгиз, 1936.
- Измаильский А. А. Как высохла наша степь. Предварительное сообщение о результатах исследований влажности почвы в Полтавской губернии в 1886–1893 гг. М.-Л.: ОГИЗ, Сельхозгиз, 1937. 76 с.
- Костычев П. Почвы Черноземья в России. Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. Москва, 1949.
- Крупеников И. А. Чернозёмы. Возникновение, совершенство, трагедия деградации, пути охраны и возрождения. Кишинев: Понтос, 2008. 288 с.
- Русский чернозем - 100 лет после Докучаева (ред. Ковда В.А.). М.: Наука, 1983. 300 с.
- Соколовский А.Н. Сельскохозяйственное почвоведение. М: Сельхозгиз, 1956.
- Чаянов А.В. Оптимальные размеры сельскохозяйственных предприятий. М, 1924. // Избранные работы. Т.6. М., 1967. 300 с.

АГРОЭКОЛОГИЯ: НАУЧНАЯ ОСНОВА ДЛЯ УСТОЙЧИВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Почти никогда и нигде еще истина не получала признания при своем первом появлении; новые взгляды всегда вызывают подозрение, всегда встречают отпор лишь потому, что они еще не общеприняты.

Опыт о человеческом разумении. Джон Локк (John Locke), 1690

Аннотация. Сельское хозяйство неустойчиво в экономическом, экологическом и социальном отношениях. Его фундаментальная проблема заключается в упрощении практики ведения сельского хозяйства в погоне за прибылью, при содействии и подстрекательстве к применению более мощной техники, большего количества удобрений и большего количества пестицидов. Новая концепция интенсификации сельского хозяйства необходима для более эффективного использования природных ресурсов и уменьшения ущерба для окружающей среды и общества.

Агроэкология обеспечивает строгую основу для устойчивой интенсификации. Она опирается на тщательное наблюдение за природными экосистемами; объединяет биологические и экологические процессы, такие как регенерация почвы, круговорот питательных веществ, фиксация азота, аллелопатия и конкуренция; и сводит к минимуму использование невозобновляемых источников энергии и их производных, которые наносят вред окружающей среде или здоровью фермеров и потребителей. Она также в полной мере использует знания и навыки фермеров, укрепляя самообеспеченность и заменяя человеческим капиталом дорогостоящие внешние промышленные вложения (инпуты); а также использует коллективную способность для решения общих проблем сельского хозяйства и охраны природных ресурсов.

Фундаментальные особенности природных экосистем, которые должны соблюдаться в агроэкосистемах, включают следующее: *многолетнее растительное покрытие* или ближайшую практическую альтернативу, которая включает в себя совместные посевы и промежуточные культуры, а также растительные остатки, которые защищают поверхность почвы и сохраняют воду; *регулярные поставки свежего органического вещества*, которое поддерживает биологическую ак-

тивность почвы; *улучшенный круговорот, дополненный большим разнообразием сельскохозяйственных культур*, в сочетании с животноводством, которые уменьшают натиск вредителей и болезней посредством обеспечения большей гетерогенности на уровне каждого поля и ландшафта. Хорошим примером имитации природных экосистем является применение в севообороте смесей многолетних трав, аналогичных растительности степей или прерий.

Для включения этих принципов в существующие системы ведения сельского хозяйства необходимы структурные изменения в сельском хозяйстве. Следует также провести анализ жизненного цикла всей продовольственной системы – не только производство продуктов питания, но также их переработка, маркетинг и потребление. Повышение осведомленности потребителей о качестве продуктов питания и здоровье окружающей среды может способствовать более устойчивым системам ведения сельского хозяйства.

Ключевые слова: промышленные вложения (инпуты), агроэкология, имитация природных экосистем, почвенный покров, растительные остатки, разнообразные севообороты, знания фермеров.

2.1. Устойчивая интенсификация земледелия

В нынешнем виде сельское хозяйство неустойчиво – в экономическом, экологическом и социальном отношениях – и особенно в отношении степей. Его фундаментальная проблема заключается в грубом упрощении практики ведения сельского хозяйства в погоне за прибылью и максимальной урожайностью, сопровождаемые использованием более мощной техники, большим количеством минеральных удобрений и большим количеством пестицидов. Упрощение практики ведения сельского хозяйства является следствием разделения различных сельскохозяйственных дисциплин (растениеводство, почвоведение, животноводство, агрохимия и т. д.) без должного внимания к их взаимосвязям в реальном сельскохозяйственном производстве. Все это, безусловно, отвечало интересам промышленности и чаще всего поощрялось правительствами. Возможно, значение промышленных технологий для продовольственной безопасности было преувеличено вместе с нашим желанием «покорять природу».

В годы пыльных бурь равнинные штаты американского Среднего Запада потеряли три с половиной миллиона человек и три четверти верхнего слоя почвы между 1930 и 1940 годами. Между 1945 и 1992 годами еще три миллиона фермерских хозяйств прекратили свою деятельность; издержки производства росли в четыре раза быстрее, чем доходы фермеров, поэтому фермеры становились банкротами. Выжившие фермы стали больше, техника стала более мощной, значительно увеличилось использование минеральных удобрений для получения урожая, ранее получаемого с гораздо меньшим объемом затрат, использование пестицидов увеличилось в десять раз, но потери урожая, вызванные насекомыми, удвоились (Rosset and Martinez-Torres, 2012). Патрик Аллитт (Patrick Allitt, 2014) рассказывает о впечатлениях своего коллеги-историка Дэвида Уорстера (David Worster) при его повторном визите в «Пыльную бурю» в 1970-х годах:

«Капиталоемкий агробизнес трансформировал местность; глубокие скважины в водоносном горизонте, интенсивное орошение, использование искусственных пестицидов и удобрений и гигантские комбайны создали огромные растения, независимо от того, шел дождь или нет. По словам фермеров, с которыми он беседовал, технология дала идеальный ответ на старые проблемы, такие плохие дни уже не вернутся. По мнению Уорстера, местный пейзаж продемонстрировал, что высокотехнологичные фермеры Америки ничему не научились. Они продолжали работать неустойчивым образом, выделяя гораздо более дешевую энергию для выращивания продуктов питания, в то время как эта энергия могла бы быть возвращена потребителям».

Стремление к максимальной урожайности с минимальными затратами ручного труда требовало механизации и поддерживалось ею. В то же время, это привело к концентрации производства и узкой специализации, которая разъединила растениеводство и животноводство. Зависимость от минеральных удобрений, гербицидов и пестицидов должна была компенсировать отсутствие севооборота, при котором разнообразие основных и промежуточных культур сдерживало распространение вредителей и болезней, а также дополнительное использование топлива и питательных веществ минеральных удобрений. Небольшое количество людей могло обрабатывать больше гектаров, и сельское население продолжало мигрировать в города.

Это, без сомнения, больше американская проблема. Но бегство от земли и стресс в продовольственной системе очевидны в большинстве стран мира, потому что краткосрочные интересы в рыночной экономике пренебрегают долгосрочными интересами местных сообществ и не принимают во внимание затраты на поддержание экологических услуг (питьевая вода и секвестрация углерода, ограничиваясь только этими двумя), не говоря уже о необходимости сохранить почву в хорошем состоянии. Результатами являются хроническая деградация земель (*Bai и др.*, 2008, 2015), загрязнение почвы, воздуха и воды (ЮНЕП, 2007) и рост миграции из бедных стран в страны с более высокими возможностями.

Много денег тратится на разработку технологий по снижению рисков ухудшения состояния окружающей среды и загрязнения, но ни одна из них не может устранить эти риски. Проблемы могут быть решены только в том случае, если будут устранены их причины – деградация и загрязнение почв и воды являются следствием неправильного управления сельским хозяйством. Любая новая и лучшая концепция интенсификации сельского хозяйства должна учитывать, что растущая численность населения требует более эффективного использования энергии, воды, почвы и генетических ресурсов – и такой подход должен соблюдаться не только в производстве, но и по всей пищевой цепи от производителей до потребителей. Устойчивая интенсификация означает «повышение урожайности без неблагоприятного воздействия на окружающую среду и без обработки большего количества земли» (*Edwards и др.*, 1993). Для достижения этой цели мы, наряду с Мигелем Альтьери (*Miguel Altieri*, 1988), утверждаем, что сельскохозяйственные предприятия (фермы) должны рассматриваться в целом, принимая во внимание круговорот питательных веществ и преобразование энергии, биологические процессы и социально-экономические отношения.

2.1.1. Агроэкология

«Устойчивая агроэкосистема поддерживает ресурсную базу, от которой она зависит, опирается на минимум искусственных ресурсов извне сельскохозяйственной системы, управляет вредителями и болезнями с помощью внутренних регулирующих механизмов и способна восстанавливаться после нарушений, вызванных выращиванием и уборкой урожая» (Gliessman, 2000). Короче говоря, мы должны имитировать природные системы, которые делают именно это. Мы называем этот подход агроэкологией, определенной Чаком Фрэнсисом вместе с большой группой исследователей из разных стран мира, как: «экология продовольственной системы», которая охватывает проблемы возделывания культур и их воздействие на окружающую среду (Francis and others, 2003). Её отличительной чертой является гораздо большее биоразнообразие во всей пищевой сети, как над, так и под почвой.

Мы производим не только сельскохозяйственные товары, но и продукты питания, поэтому, стремясь к устойчивости, мы должны исследовать не только производство продуктов питания, но также переработку, маркетинг и потребление, иногда называемые анализом жизненного цикла. Как потребители, мы должны были бы спрашивать: где это произведено? как это производится? как это влияет на окружающую среду, здоровье и благополучие людей? Ответы на подобные вопросы помогают лучшему пониманию состояния природных ресурсов, всей пищевой цепи, качества продуктов питания, связанные с этим вопросы общественного здравоохранения и окружающей среды, а также меры, которые могут быть приняты, чтобы изменить положение вещей к лучшему.

Отношение может быть изменено улучшением системы образования. Долгое время учебные программы по агрономическим дисциплинам рассматривали вопрос о том, как выращивать сельскохозяйственные культуры, но без учета связанных с этим вопросов во всей пищевой цепи: например, более 75 процентов энергии расходуется на переработку, транспортировку, маркетинг и потребление (Pimentel, 2011), и до 30 процентов произведенных продуктов питания никогда не доходят до стола потребителя (Lal, 2009). Само собой разумеется, что сокращение разрыва между производителями и потребителями должно как-то способствовать решению проблем продовольственной безопасности, эффективного использования природных ресурсов и ухудшения состояния окружающей среды. Некоторые принципы изложил в своей работе Жюль Претти (Jules Pretty, 1998):

- Интеграция биологических и экологических процессов, таких как круговорот питательных веществ, фиксация азота, регенерация почвы, аллелопатия, конкуренция, хищничество и паразитизм в процессах производства продуктов питания.
- Минимизировать использование невозобновляемых ресурсов, которые наносят вред окружающей среде или здоровью фермеров и потребителей.
- Использовать знания и навыки фермеров, тем самым повышая их самообеспеченность и заменяя человеческим капиталом дорогостоящие внешние ресурсы (инпуты).
- Более продуктивное использование коллективного потенциала людей для совместной работы по решению общих проблем в области сельского хозяйства и природных ресурсов, таких как борьба с вредителями, водосборы, ирригация, леса и кредиты.

2.2. Природные экосистемы как модель для построения устойчивых агроэкосистем

Исследователи сходятся во мнении, что повышение устойчивости агроэкосистем требует большего биологического разнообразия и круговорота питательных веществ и энергии, достигаемых в естественных системах путем синтеза и разложения органического вещества почвы (Kremen и др., 2012, *Chappell and LaValle*, 2009). Современные системы земледелия заменили эти биологические функции путем использования минеральных удобрений, но одни только удобрения не могут компенсировать отсутствие более разнообразной пищевой цепи над и под поверхностью почвы. В то же время гербициды и пестициды заменили сложный биологический контроль над сорняками, вредителями и болезнями, но химические агенты нарушают агроэкосистему и наносят ущерб ее функционированию. Комплексное управление вредителями (КУВ) было предложено в качестве меры по ограничению ущерба, но основная проблема заключается в сильно упрощенных экосистемах, которые не способны регулировать вредителей и болезни (Altieri, 1987, 2000), поэтому во многих местах КУВ стал интегрированным управлением пестицидами.

Жизнеспособная альтернатива необоснованному применению энергии и агрохимикатов должна решать экономические, экологические и социальные проблемы. Крупный бизнес восприимчив к идее замены химических препаратов биологическими на том основании, что биологические препараты безопаснее для людей и окружающей среды и дешевле; фермеры, привыкшие к технологической модернизации, принимают такие инновации, не меняя структуру своих систем ведения сельского хозяйства; но замена промышленных вложений не решает коренным образом проблемы, с которыми сталкиваются фермеры (Rosset and Altieri, 1997). То же самое относится и к органическим фермам, которые используют биологические пестициды, коммерческие компосты, ботанические экстракты, микробные и другие препараты для почвы, которые не изменяют модель, зависящую от промышленных инпутов, или помогают фермерам избежать ценового давления. Мы должны стремиться к увеличению биоразнообразия пищевой цепочки почвы, чтобы повысить ее эффективность и обеспечить лучшую борьбу с вредителями и болезнями вместе с другими экосистемными услугами, такими как поглощение растениями питательных веществ и сокращение их потерь в атмосферу и в грунтовые воды, секвестрация углерода и др.

Даже результаты, полученные в длительных полевых опытах, могут ввести в заблуждение исследователей и производителей. Например, для оценки эффективности различных питательных веществ или удобрений принято сравнивать данные, полученные на неудобренных делянках (контроль), с данными на удобренных делянках. Результаты могут быть приведены в качестве аргумента для поддержки концепции ограничивающих факторов Либиха. Чем дольше участки остаются неудобренными, особенно под культурами с большей потребностью в питательных веществах, тем больше будет эффект от внесения минеральных удобрений, особенно азотных. Но эффект удобрения может быть значительно уменьшен путем изменения состава культур, в частности, путем включения бобовых культур в севооборот. Об этом ясно свидетельствуют данные длительных полевых опытов на типичном черноземе в Бельцкой степи, которые обсуждаются в следующих главах.

В этом контексте многофакторные полевые опыты более показательны, чем однофакторные.

Стабилизация урожайности растений, несмотря на постоянное внедрение новых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур с более высокими показателями урожайности (отношение зерна к общей биомассе урожая), внесение повышенных доз азотных удобрений и крупные инвестиции в ирригацию, вызывают беспокойство. Причины этого заключаются в изменении свойств почвы, в частности, в снижении потенциальной возможности почвы обеспечить потребности растений в азоте, которое было компенсировано более высокими дозами минеральных удобрений в сочетании с пестицидами. Можно ожидать, что существует тесная связь между качеством почвы и продуктивностью сельскохозяйственных культур, но Кеннет Кассман и другие (*Casman* и др., 1999) обнаружили, что большие различия в запасе азота в почве не были связаны с различиями в содержании органического вещества почвы, в общем содержании азота и других подвижных форм содержания азота в почве. Их исследование было проведено в хозяйстве далеко от степи – на Филиппинах. Сравнение урожайности на 42 соседних неудобранных рисовых полях показало разницу от 2400 до 6000 кг/га. Эти данные указывают на потенциал точного земледелия для более эффективного использования ресурсов и уменьшения загрязнения и деградации окружающей среды, но точное земледелие не меняет существующую систему земледелия.

Ж. Претти (*Pretty*, 2008) представляет данные *Odum* и *Gliessman* (2000), сравнивающие природные и современные агроэкосистемы (таблица 2.1).

Таблица 2.1. Свойства природных экосистем в сравнении с современными и более устойчивыми агроэкосистемами

Свойства	Природная экосистема	Современная агроэкосистема	Более устойчивые агроэкосистемы
Урожайность	Средняя	Высокая	Средняя (возможно высокая)
Видовое разнообразие	Высокое	Низкое	Среднее
Функциональное разнообразие	Высокое	Низкое	Средней высоты
Стабильность урожаев	Среднее	Низкая	Высокая
Накопление биомассы	Высокое	Средняя	Средней высоты
Круговорот питательных веществ	Закрытый	Открытый	Полузакрытый
Трофические взаимоотношения	Сложные	Простые	Промежуточные
Естественное регулирование населения	Высокое	Низкое	Средней высоты
Способность адаптироваться	Высокая	Низкая	Средняя
Зависимость от внешних промышленных вложений	Низкая	Высокая	Средняя
Человеческое замещение экологических процессов	Низкое	Высокое	Низкое среднее
Устойчивость	Высокая	Низкая	Высокая

Доминирующим современным агроэкосистемам не хватает наземного и подземного биоразнообразия. Вместо этого однородность (однообразие) повышается за счет упрощенных севооборотов или непрерывной монокультуры на больших полях, которые ухудшают экосистемные услуги и в то же время нуждаются во все большем количестве удобрений и пестицидов для «борьбы» с дефицитом питательных веществ и накоплением вредителей и патогенов растений. Эта проблема была подчеркнута в Специальном отчете о праве на питание, представленном Генеральной Ассамблеей ООН (27 февраля – 24 марта 2017 года): «Пестициды повинны в потере биоразнообразия и загрязнении воды и почвы, отрицательно влияя на продуктивность пахотных земель, создавая тем самым угрозу будущему производству продуктов питания... За последние десятилетия разнообразие сельскохозяйственных систем значительно сократилось с точки зрения культур и сортов, выращиваемых в естественной среде обитания. Результатом является потеря экосистемных услуг, таких как естественная “борьба” с вредителями посредством хищников и потеря плодородия почвы. Несмотря на резкое увеличение использования пестицидов в течение последних 40 лет, потери урожая не сократились. Селекционеры сосредоточились на высокоурожайных сортах, но они, как правило, более восприимчивы к вредителям и болезням. Возвращая разнообразие, агроэкология может внести существенный вклад в сокращение использования пестицидов и «стимулировать полезные биологические взаимодействия между различными растениями и видами для создания долгосрочного плодородия почвы и ее здоровья». В своем докладе Генеральный директор ФАО заключил: «Мы достигли поворотного момента в сельском хозяйстве. Сельскохозяйственная политика, торговые системы и корпоративное влияние на государственную политику должны быть поставлены под сомнение, если мы хотим отойти от промышленной пищевой системы, зависящей от пестицидов». Специальный отчет рекомендовал:

- Комплексные национальные планы действий, которые включают стимулы для поддержки альтернатив опасным пестицидам и обязательные и измеримые цели их сокращения с временными ограничениями.
- Системы, которые позволяют различным национальным учреждениям, отвечающим за сельское хозяйство, здравоохранение и окружающую среду, эффективно сотрудничать в «борьбе» с неблагоприятным воздействием пестицидов и снижением рисков, связанных с их неправильным использованием и злоупотреблением.
- Сначала рассматривать нехимические альтернативы и только потом позволять регистрировать химические вещества, где такая потребность есть и может быть продемонстрирована.
- Поощрять фермеров, применяющих агроэкологические методы, которые повышают биоразнообразие и естественным образом подавляют вредителей, а также применяющих севооборот, управление плодородием почвы и подбор культур, соответствующих местным почвенно-климатическим условиям.
- Отмена субсидий на пестициды и, вместо этого, введение налогов на пестициды, импортные тарифы и сборы за использование пестицидов.

В рамках Европейского союза к числу нормативных актов, способствующих внедрению более устойчивых методов ведения сельского хозяйства, относятся: «Директива по нитратам», «Рамочная директива по водным ресурсам», «Рамочная директива по пестицидам, экологизация второго компонента Общей сельскохозяйственной политики» и различные агроэкологические схемы (*Wezel and others*, 2014).

Хорошим примером имитации природных экосистем является использование смесей многолетних трав, аналогичных степной растительности (*Jackson*, 1980, *Soule and Piper*, 1992), и те же принципы должны соблюдаться в агроэкосистемах: непрерывный растительный покров, который сохраняет как почву, так и воду, что может быть достигнуто за счет покровных культур и взаимодействия между основными культурами – насколько это возможно; регулярные поставки свежего органического вещества, которое поддерживает биологическую активность почвы; круговорот веществ и энергии, усиленный большим разнообразием сельскохозяйственных культур, в том числе с включением многолетних бобовых трав, интегрированных с животноводством, которые также подавляют вредителей и болезни посредством гетерогенности на полевом и ландшафтном уровнях (*Rosset and Altieri*, 1997).

Биоразнообразие надземной части экосистемы определяет биоразнообразие пищевой цепочки в самой почве. Чем больше разнообразие в пищевой сети почвы, тем больше функциональность почвы. Сравнивая традиционные системы ведения сельского хозяйства с более разнообразными системами ведения сельского хозяйства, Клэр Кремен и Тия Майлз (*Kremen and Miles*, 2012) из Калифорнийского университета, Беркли, обнаружили, что биологически более разнообразные системы меньше нуждаются в промышленных вложениях и предоставляют большее разнообразие экосистемных услуг сельскому хозяйству и обществу. Наблюдаемые преимущества более разнообразных систем ведения земледелия включают:

- разложение растительных остатков и круговорот питательных веществ;
- биологическую азотфиксацию и трансформацию органического азота;
- увеличение поглощения углерода, формирование структуры почвы и способность удерживать почву, а также снижение потенциала глобального потепления и устойчивости к экстремальным погодным явлениям;
- подавление почвенных патогенов через антагонизм;
- более эффективный контроль над сорняками, лучшее опыление;
- синтез ферментов, витаминов, гормонов и антибиотиков, которые регулируют популяции и процессы и позволят использовать меньше химических средств;
- более стабильные урожаи; по сравнению с современными агроэкосистемами устойчивые агроэкосистемы не ориентированы на максимальные урожаи, но надежные урожаи с более низкими производственными затратами могут фактически принести большую прибыль.

Gaëtan Vanloqueren и *Philippe Baret* (2009) проанализировали развитие генной инженерии и агроэкологии во второй половине двадцатого века. Они обнаружили, что генная инженерия и дополнительная дисциплина – молекулярная биоло-

гия – получили на несколько порядков больше финансовой поддержки, чем агроэкология. Научные основы этих двух направлений весьма различны: в то время как агроэкологическая инженерия рассматривает структуру системы на уровне экосистем или ландшафтов для более эффективного использования ресурсов с меньшим ущербом для окружающей среды, генная инженерия манипулирует генетическим материалом для создания культур с устойчивостью или толерантностью к неблагоприятным биотическим и абиотическим условиям. Исследования в области сельскохозяйственной биотехнологии активно поддерживаются как в США, так и в Европе, и их достижения могут быть запатентованы и защищены, что увеличивает их рыночный потенциал, особенно для частных компаний. Вопреки мораторию Европейской комиссии на трансгенные культуры (2002, 2004), исследования продолжаются, и поскольку государственное финансирование науки с годами сократилось, частные компании расширяют свою поддержку генной инженерии посредством государственно-частных партнерств, чтобы больше ученых из университетов работали в интересах частных компаний (Wezel и др., 2014, Kremen and Miles, 2012).

В настоящее время может показаться, что агроэкология плывет против течения истории, которую направляют более крупные фермы, более крупные машины и агробизнес, движимые транснациональными компаниями. Это можно даже считать социальным движением (Rosset and Martinez-Torres, 2012) от предпринимательского фермерства к системе, менее зависимой от производственных ресурсов и денежных рынков и более устойчивой к изменению климата (Van Der Ploeg, 2013); недоброжелатели могли бы назвать это возвращением к крестьянскому хозяйству. Нет достаточных доказательств для общего утверждения о том, что мелкие фермеры производят 70–80 процентов мировых продуктов питания; тем не менее, недавно составленная глобальная выборка субнациональных данных и сельскохозяйственных переписей показывает, что фермы площадью менее 2 га производят 30–34% продовольствия в мире на 24% пахотных земель и объясняется это большим разнообразием культур (Ricciardi and others, 2018); по другим оценкам (Kremen and others, 2012), 60 процентов производства мяса и 75 процентов мировых молочных продуктов производятся в смешанных хозяйствах с растениеводством и животноводством; и мелкие фермеры могут легче обслуживать местные и региональные рынки, в отличие от международных рынков, на которые трудно проникнуть и которые в настоящее время игнорируют воздействие сельскохозяйственного производства на окружающую среду на местном уровне.

Учитывая это, нет оснований, по которым хозяйства не должны заниматься агроэкологией. Все больше людей делают это под лозунгом «Консервативное сельское хозяйство» и считают его более выгодным, а также более устойчивым, чем применение механической силы и химических веществ, например, Рейнольдс (Reynolds, 2018). Но для осуществления перехода к более устойчивому сельскому хозяйству необходимы социальные изменения. Потребители, осознавая влияние качества пищи, которую они едят, не только на свое здоровье, но и на окружающую среду и сообщество людей, могут сыграть решающую роль.

2.3. Выводы

- Требуется новая концепция интенсификации земледелия, чтобы более эффективно использовать природные ресурсы и наносить меньший ущерб окружающей среде и обществу.
- Агроэкология обеспечивает строгую научную основу для устойчивой интенсификации земледелия, основанную на более интенсивном использовании и круговороте сельскохозяйственных ресурсов возобновляемой энергии, в противоположность внешним промышленным вложениям.
- Структурные изменения в сельском хозяйстве необходимы для включения принципов устойчивого сельского хозяйства в существующие системы ведения сельского хозяйства.
- Повышение осведомленности потребителей о качестве пищевых продуктов и здоровье окружающей среды может помочь переходу к более устойчивой продовольственной системе.

Список литературы

- Allitt P 2014 *A climate of crisis: America in the age of environmentalism*. Penguin History of American Life. The Penguin Press, New York
- Altieri MA 1988 Beyond agroecology: making sustainable agriculture part of a political agenda. *American Journal of Alternative Agriculture* 3, 4
- Bai ZG, DL Dent, L Olsson & ME Schaepman 2008 Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management* 24, 223-234
- Bai ZG, DL Dent, L Olsson and others 2015 A longer, closer look at land degradation. *Agriculture for Development* 24, 1, 3-9
- Chappell M and L LaVall 2011 Food security and biodiversity: can we have both? An agroecological analysis. *Agriculture and Human Values* 28, 1, 3-26
- Cassman KG, SK De Datta, D Olk and others 1999 Yield decline and the nitrogen economy of long-term experiments on continuous irrigated rice systems in the tropics. 181-222 in R Lal and BA Stewart (editors) *Soil Management. Experimental basis for sustainability and environment quality*. Advances in Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton FL
- Francis C, G Lieben, S Gliessman and others 2003 Agroecology: the ecology of food system. *Journal of Sustainable Agriculture* 22, 99-118
- Gliessman S 2000 *Agroecology. Ecological processes in sustainable agriculture*. Lewis Publishers, Boca Raton FL
- Jackson W 1980 *New roots for agriculture*. University of Nebraska, Lincoln NE
- Kremen C 2015 Reframing the land-sparing /land sharing debate for biodiversity conservation. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1355, 52-76
- Lal R 2009 Soils and world food security. *Soil and Tillage Research* 102, 1-4
- Odum EP 1983 *Basic ecology*. CBS College Publishing, New York
- Pimentel D, M Whitecraft, ZR Scott and others 2010 *Will limited land, water and energy control human population numbers in the future?* Springer Science+Business Media LLC
- Pretty J 1998 *The living land. Agriculture, food and community regeneration in rural Europe*. Earthscan, London
- Reynolds AJ 2018 A Farmer's perspective on sustainable agriculture: fifteen years of conservation agriculture's effect on soil and water Health. In JA Allan and others (editors) *The Oxford handbook of food, water and society*. Oxford University Press, New York

- Ricciardi V, N Ramankutty, Z Mehrabi and others 2018 How much of the world's food do smallholders produce? *Global Food Security* 17, 64-72
- Rosset P and M Martinez-Torres 2012 Rural social movements and agroecology: context, theory and process. *Ecology and Society* 17, 3-17
- Rosset P and MA Altieri 1997 Agroecology versus input substitution: a fundamental contradiction of sustainable agriculture. *Society and Natural Resources* 10, 283-295
- Soule J and J Piper 1992 *Farming in Nature's image. An ecological approach to agriculture*. Island Press, Washington DC
- UN 2017 *The right to food*. Special report to the UN General Assembly, 27 February-24 March 2017
- UNEP 2007 *Global environmental outlook GEO4, chapter 3 Land*. UN Environment Programme, Nairobi
- Van Der Ploeg JD 2013 *Peasants and the art of farming. A Chayanovian Manifesto*. Agrarian Change and Peasant Studies, Fernwood Publishing, Halifax and Winnipeg
- Vanloqueren G and P Baret 2009 How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Research Policy* 38, 6, 971-983
- Wezel A, S Bellon, T Doré and others 2009 Agroecology as a science, a movement, and a practice. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 4, 503-515

ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЕ, КАЧЕСТВО ПОЧВЫ И МЕНЕДЖМЕНТ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВЫ

*Со старых полей, которые засевают мужчины,
каждый год приходит это новое зерно.*

Джофри Чосер (Geoffrey Chaucer), 1374

Аннотация. Чернозем был создан многолетней злаковой растительностью для ее же пользы. Выдающимися характеристиками чернозема являются плодородие, быстрая водопроницаемость в сочетании с большим запасом доступной воды и устойчивость к выветриванию и неблагоприятным погодным условиям. Разрушение дерна в 18-м и 19-м веках и вспашка привели к деградации почвы и ее способности производить урожай и оказывать экосистемные услуги. Сосредоточение основного внимания на урожайности создало целый ряд экологических и социальных проблем: деградация поверхностного слоя сделала почву более чувствительной к засухе, вырубка лесов и распашка лугов в поймах повысила уязвимость к наводнениям. Эти проблемы, скорее, политические, чем научные. При наличии политической воли их можно преодолеть: яркими примерами являются принятие общенациональной программы сохранения почв в США после Пыльной бури в конце 1930-х годов и реализация Плана по преобразованию природы в СССР после засухи 1946–1947 гг.

Опыт фермеров и многолетние полевые опыты показывают, что органическое вещество почвы (ОВП) является интегральным показателем плодородия почвы. За прошедшее столетие черноземы потеряли половину своего первоначального запаса органического вещества; по сравнению с целинными почвами потери были больше, и они продолжаются за счет повышенной минерализации, вызванной интенсивной обработкой почвы и недостаточным внесением растительных остатков сельскохозяйственных культур и навоза. Сельское хозяйство с постоянным дефицитом энергии является неустойчивым. Точно также сельское хозяйство, которое пренебрегает структурой почвы, вполне может превратить степи в пустыню.

Регулярное высвобождение питательных веществ для растений зависит от размера мобильной части органического вещества в почве, а его запасы поддерживаются под севооборотами с многолетними травами и хорошей заправкой навозом.

Чем больше поступление свежего органического вещества, тем больше минерализация ОВП и способность почвы удовлетворять потребности растений в питательных веществах. Однако урожайность не коррелирует с общим ОВП или даже с его подвижной фракцией: биохимический состав, скорость оборота и способность выделять питательные вещества являются наиболее важными факторами формирования урожайности.

Разнообразие культур в севообороте, в отличие от непрерывной монокультуры, увеличивает способность корневой системы поглощать питательные вещества и воду из почвы. Это снижает зависимость фермеров от промышленных вложений для питания сельскохозяйственных культур и контроля численности и вредоносности вредителей и болезней: низкое качество почвы должно быть компенсировано дорогостоящими внешними вложениями (инпутами).

Ключевые слова: качество почвы, плодородие, структура, водопроницаемость, запасы доступной воды, лабильное органическое вещество почвы, навоз и удобрения, дефицит энергии, севооборот, монокультура.

3.1. Введение

Черная земля – чернозем в «Мировой справочной базе почвенных ресурсов» (IUSS, 2015), Mollisols – в Почвенной «таксономии» (Soil Survey Staff, 2017) – является наилучшей почвой степей и прерий. Она занимает 2 167 383 км², огромная площадь, но это только 1,7% от общей площади, свободной ото льда. Самые большие области черноземья находятся в России, Украине, Казахстане, США и Канаде; чернозем занимает наибольшую часть территории в Молдове, Украине, Болгарии, Румынии и Казахстане (таблица 3.1).

Среднегодовое количество осадков по черноземному поясу колеблется от 350 до 1500 мм, а среднегодовая температура от –4 до +16 °С. По всей лесостепи России количество осадков колеблется от 350 до 700 мм, а годовая температура от –4 до +8 °С; в Украине количество осадков находится в пределах от 490 до 650 мм при годовой температуре от 7,0 до +7,7 °С; в степи и лесостепи на северо-востоке Китая осадки выпадают в количестве от 300 до 600 мм, а годовая температура от 2,5 до 5,6 °С (Liu и др., 2012).

В этих условиях изобильная корневая система лугов создает почвы, богатые гумусом, с черным верхним слоем почвы глубиной от 30 до 160 см, содержащим от 200 до 700 т/га органического вещества почвы (ОВП). В девственных степях и прериях верхний слой почвы характеризуется водостойкой зернистой структурой с тесно связанными гумусными и минеральными фракциями, богатыми N, P, S и Ca, с высокой насыщенностью основаниями и нейтральной реакцией, он лежит на известковой подпочве. Его выдающимися характеристиками являются плодородие, быстрая проницаемость в сочетании с большой емкостью доступной воды и устойчивостью к эрозии. Большинство черноземов – это суглинки или тяжелые суглинки; структура, минералогия и химический состав довольно стабильны, наиболее изменчивым компонентом является ОВП, составляющее

Таблица 3.1. Распределение чернозема по странам, подготовленное д-ром *Zhanguo Bai* из базы данных по Гармонизированной международной базе данных по почвам – ФАО и др. (2013)

Страны	Вся площадь (km ²)	Относительная площадь (% от всей площади страны)
Австрия	4 077	4.9
Болгария	20 787	18.7 (3)
Канада	193 984 (5)	1.9
Китай	78 009	0.8
Чешская Республика	6 513	8.3
Сербия	6 752	2.9
Грузия	1 015	1.5
Германия	10 422	2.9
Венгрия	6 827	7.3
Казахстан	225 304 (3)	8.3 (5)
Монголия	3 789	0.2
Польша	544	0.2
Республика Молдова	24 962	73.7 (1)
Румыния	24 322	11.9 (4)
Российская Федерация	1 061 144 (1)	6.2
Словакия	2 749	5.6
Украина	282 164 (2)	46.7 (2)
Соединенные Штаты Америки	210 019 (4)	2.2

3-6% по массе в культивируемых почвах, и по этой причине плодородие, продуктивность и многие другие функции почвы зависят от устойчивого менеджмента (*Krupenikov* и др., 2011, *Boincean*, 2015). Но в условиях пахотных земель, в частности в условиях интенсивных систем индустриального земледелия, постоянные потери ОВП усугубляются эрозией почвы до такой степени, что способность почвы предоставлять экосистемные и культурные услуги находится под угрозой.

ОВП является интегральным показателем плодородия почвы, тогда как урожайность может вводить в заблуждение. Продуктивность может поддерживаться в течение нескольких лет за счет внесения удобрений и орошения; это связано не столько с общим запасом ОВП, сколько с количеством и качеством свежих органических остатков, добавленных в почву. Однако физическая структура почвы, ее плодородие, водопроницаемость и устойчивость к водной и ветровой эрозии зависят от органического вещества почвы.

3.2. Изменение землепользования и менеджмент почвы

Деградация почв вызывает беспокойство. *Bai* и др. (2008, 2015), используя спутниковые измерения нормализованного разностного индекса растительности, показали снижение первичной продуктивности более, чем на четверти поверхности земли за последнюю четверть века; *Hooke* и *Martin-Duque* (2012) считают, что сорок процентов сельскохозяйственных земель в некоторой степени деградировали. Самые последние данные (рис. 0.4 и 0.5) показывают, что наиболее сильно пострадавшие районы включают черноземные и каштановые почвы в степях Молдовы, Украины, России и Казахстана, Китая, а также Черную Землю в Гранд Чако и Пампасах Южной Америки.

Пахотная земля подвержена трем видам деградации почвы: физической (водная и ветровая эрозия, заболачивание, уплотнение, уменьшение инфильтрации и способность к накоплению воды); химической (засоление, защелачивание, подкисление, вымывание питательных веществ, загрязнение тяжелыми металлами и пестицидами); и биологической (истощение почвенного органического вещества и сокращение биологического разнообразия, включая дождевых червей и полезную мезофауну, грибы и бактерии). Ежегодные потери почвы в результате эрозии составляют около 75 миллиардов тонн, что соответствует экономическим потерям, эквивалентным 400 миллиардам долларов США в год, но, что более важно, деградированные почвы не могут оказывать экосистемные услуги, от которых зависит благосостояние общества и вся жизнь на Земле, а именно:

- *снабженческие услуги*: поставка продуктов питания, волокон, топлива, древесины, сырья, среды обитания и генетических ресурсов;
- *регулирующие услуги*: водоснабжение и качество воды, биоразложение загрязняющих веществ, улавливание (секвестрация) углерода, регулирование климата, уменьшение опасности наводнений и эрозий;
- *вспомогательные услуги*: чистая первичная продукция, круговорот питательных веществ и почвообразование;
- *культурные услуги*: эстетические и культурные выгоды от использования почвы.

В 2007 г. общая площадь суши, измененная в результате деятельности человека, составила $69,6 \pm 6,7$ млн км², что составляет $54 \pm 5\%$ поверхности земли. Это включало $60,6 \pm 6,5$ млн км² сельскохозяйственных угодий и лесов; разница в $9,0 \pm 1,7$ млн км² отражает расширение инфраструктуры городских районов, автомобильных дорог, железных дорог, горных работ, карьеров и т. д.). Первозданные и подверженные изменениям природные леса, горы, тундра и пустыня составляют 60,5 млн км² или 46,5% поверхности суши (*Hooke and Martin-Duque*, 2012). Изменения в землепользовании в результате деятельности человека имеют как прямые, так и косвенные последствия. Вспашка и применение минеральных удобрений и пестицидов уменьшают местное биоразнообразие, что, в свою очередь, наносит ущерб смежным территориям и ресурсам, в частности эффективности естественного контроля над вредителями и болезнями. Черноземы потеряли 30-70 процентов своего исходного запаса органического вещества почвы (ОВП), которое поддерживает

структуру почвы и питает ее жизнь, поэтому они не настолько устойчивы к засухе и эрозии, как раньше, и менее способны к самовосстановлению.

Если деградация земель не будет прекращаться, растущие потребности общества скоро превысят способность Земли их обеспечивать. Международные инициативы, направленные на более устойчивое управление почвенными ресурсами, включают в себя: «Повестку – 2030», «Цели ООН в области устойчивого развития», проблему нулевого голода, адаптацию к изменению климата и смягчению его последствий, включая Парижское соглашение 2015 года, принятую на UNFCCC COP 21 и UNCCD COP 12 Декларацию о борьбе с опустыниванием и смягчением последствий засухи (Киотский протокол в рамочной конвенции ООН об изменении климата РКИКООН 1997, 201).

Какими бы ни были ответы на увеличение населения планеты до 9,8 миллиардов человек в 2050 году и прогнозируемые 11,2 миллиарда к 2100 году, сокращение сельского хозяйства не может быть одним из них, но устойчивость требует баланса между спросом и продукционной способностью почвы. Мальтузианская альтернатива – это голод, болезни, война и ускорение миграции от бедности в более обеспеченные страны. Обычный бизнес невыгоден, потому что современные системы земледелия способствуют активной деградации земли, почвы и воды. С другой стороны, поддержание или улучшение продуктивной способности почвы облегчит некоторые из этих последствий, и чернозем, как наиболее плодородная почва, может и должен сыграть большую роль в этом.

Большая часть черноземов была распахана в 18 и 19 веках. Историк Дэвид Мун (*David Moon*, 2008, 2013) отмечает пятикратное расширение пахотных угодий по степям в период с 1725 по 1887 год. Эта тенденция продолжалась и в 20 веке. Вокруг Белгорода (Россия) в 1780 году девственные степи и леса занимали 22% и 16% провинции соответственно. В течение следующих 70 лет площадь под лесом сократилась до 13 процентов, при этом осталось мало девственных степей. К 1917 году леса сократились до 8 процентов, а целинная степь сохранилась лишь в отдельных местах (*Chendev and others*, 2015). В результате многолетняя растительность, которая обеспечивает круглогодичный почвенный покров, и щедрый ежегодный прирост свежего органического вещества были заменены однолетними культурами, которые не дают ни того, ни другого. Чем больше разнообразие на ландшафтном уровне, тем лучше предоставляемые услуги. Ограниченное внимание к сельскохозяйственному производству, без учета многих других функций, выполняемых ландшафтом, создало целую гамму экологических и социальных проблем. Эти проблемы носят политический характер и не обязательно являются научными, поэтому при наличии политической воли их можно преодолеть: выдающимся примером является принятие общенациональной программы сохранения почв в США в конце 1930-х годов после Пыльной бури и ее продолжения, в некоторой форме, до наших дней.

Работы Докучаева (1892), Костычева (1949) и Вильямса (1950-1952) свидетельствуют о ценности агролесоводства в сочетании с севооборотами и водоемами для смягчения засухи в степях. Катастрофическая засуха 1891-1892 годов принесла голод; власти, фермеры и ученые искали пути смягчения его последствий, и именно в этот период Докучаев опубликовал свою провидческую книгу «Наши степи прежде и теперь». Точно так, как и в случае с Пыльной бурей, 40 лет спустя, это было сти-

хийное бедствие, которое подчеркнуло необходимость сохранения почвы и воды. Опять же, в 1948 году, после засухи и голода 1946-1947 годов, Совет Министров СССР принял План полезащитных полос, введение севооборотов, строительство прудов и водоемов для обеспечения высоких урожаев в степных и лесостепных районах европейской части СССР, известный как *Сталинский план преобразования природы*. Более 120 млн га были защищены от ветров; пруды и водохранилища способствовали повышению влажности атмосферы, были введены и освоены севообороты. В период с 1949 по 1953 год было высажено более 2,1 млн га полезащитных лесополос (Ghendev и др., 2015). Реализация плана сопровождалась заметным увеличением урожайности, но история была быстро забыта. В период с 1954 по 1963 год в рамках кампании по освоению целинных земель, направленной на увеличение производства зерна, продвигаемой первым секретарем Хрущевым, в России и Казахстане было распахано более 45 млн га низкорослой степи, что привело к катастрофическим потерям гумуса, засолению, эрозии почвы и пыльным бурям. Вскоре урожайность зерна упала, и сельское хозяйство стало еще более уязвимым для непредсказуемого климата (Kraemer и др., 2007).

В настоящее время соотношение пашня: лес: луг в Молдове составляет 61:25:14. В Украине земля разделена следующим образом: 324 млн га пахотных земель, 141 млн га пара, 241 млн га травостоя (под сенокос), 55 млн га пастбищ и 0,9 млн га многолетних культур. Изменение структуры землепользования необходимо для предотвращения эрозии почвы, но доля пахотных земель под пропашными культурами увеличивается из-за требований рынка и рыночных правил.

Доля посевов в Молдове увеличилась с 60% в 1990 году до 67% в 2012 году. Доля пропашных культур увеличилась с 60% в 1990 году до 67% в 2012 году, а доля пашни под культурами сплошного способа посева сократилась с 41 до 34% (таблица 3.2). Упадок животноводства сопровождался еще большим сокращением площадей под кормовыми культурами (с 32 до 5 процентов) и фактическим исчезновением люцерны.

Таблица 3.2. Изменения посевных площадей в Республике Молдова с 1990 по 2012 гг.

Показатели	1990		2012		2012 относительно к 1990	
	10 ³ га	%	10 ³ га	%	10 ³ га	%
Всего пахотных земель	1675	100	1460	100	-215	13
В т.ч.: культуры сплошного посева	688	41	489	34	-199	29
Зерновые колосовые культуры	407	24	454	31	+47	12
Многолетние бобовые культуры	192	12	5	0.3	-187	97
Пропашные культуры	987	60	972	67	Под -15	2
В т.ч.: кукуруза на зерно	258	15	416	29	+158	61
Подсолнечник	134	8	252	17	+118	88
Кормовые культуры	538	32	75	5	-463	86

Вместе со значительным сокращением количества внесенных удобрений, особенно навоза (таблица 3.3), эти структурные изменения повысили уязвимость пахотных земель к деградации. После распада СССР такие изменения произошли в других регионах, и многие пахотные земли были заброшены (*Kraemer and others* 2007). Вероятно, маргинальные земли должны быть возвращены под пастбища, потому что выпас является более эффективным использованием этих площадей (*Boonman* и др., 2015), но, безусловно, необходимо пересмотреть многие предвзятые мнения о землепользовании в свете состояния экономики и природных ресурсов.

Таблица 3.3. Использование минеральных удобрений и навоза в Молдове с 1990 по 2012 гг. (по данным ежегодных статистических сборников Молдовы)

	1990 всего (тысяч тонн)	На 1 га	2012 всего (тысяч тонн)	На 1 га
Навоз крупного рогатого скота	9 700	5 т	15	0.02 т
Минеральные удобрения	217	136 кг	20	24 кг

Исследования, проведенные в Институте почв в Салине, штат Канзас, подтвердили более сложную структуру пищевой сети в условиях многолетней растительности по сравнению с однолетними культурами. Гловер и другие (*Glover and others*, 2007, 2010) сообщили, что неудобренные многолетние пастбища обеспечивают содержание азота в убранный биомассе, сопоставимое с содержанием в убранный зерне с прилегающих высокопродуктивных пшеничных полей; неудобренное пастбище в течение 75 лет содержало на 26% больше азота на гектар, чем почвы под однолетними культурами. В то же время потери азота при вымывании и общие потребности в энергии ниже для многолетних культур, чем для однолетних (*Culman* и др., 2009). Аналогичные данные были получены и в других местах: Михайлова и др. (2000) сообщают, что 50-летнее ежегодное скашивание на неудобренных многолетних пастбищах на российском черноземе не приводило к снижению содержания почвенного органического углерода (ПОС) и общего содержания N в почве до глубины 2 м по сравнению с нескошенными лугами. Аналогичным образом, данные длительных полевых опытов в Ротамстеде, Англия, показывают, что уборка сена в течение 120 лет не привела к снижению урожайности и общего содержания азота в почве (*Jenkinson and Rayner*, 1977, *Jenkinson and Coleman*, 2008).

Российские ученые давно признали связь между растительностью и почвообразованием (Вильямс, 1950–1952; Раменский, 1971; Сукачев, 1975). Вильямс подчеркивал вклад смеси многолетних злаковых трав и бобовых трав в повышение плодородия почв в степных условиях, особенно в сочетании с содержанием домашнего скота, но нужно больше исследований по эффективной продолжительности таких смесей в севооборотах и о том, как управлять ими (пастбища или под сенокос), и какой должна быть продолжительность однолетних посевов. Для регенерации почвы ботанический состав растительности важнее, чем производство биомассы. Естественная степная растительность переходит в состояние покоя в

течение долгого сухого лета и снова прорастает осенью, когда погода более благоприятная. У нас недостаточно знаний о правопреемственности растений после прекращения вспашки, но требуется около 10–15 лет, для того чтобы что-то вроде естественной степной растительности восстановилось с такими видами, как *Stipa lessingiana* и *Festuca sulcata*.

3.3. Здоровье почвы и ее качество

Здоровье почвы определяется как «способность живой почвы функционировать в границах естественных или управляемых экосистем, поддерживать продуктивность растений и животных, поддерживать или улучшить качество воды и воздуха, а также улучшить здоровье растений и животных» (Dogan, 2002). Но это крайне важно для поддержания экосистемных услуг. Продуктивность сельскохозяйственных культур – только одна из них, и производительность сама по себе может маскировать реальное состояние здоровья почвы: данные длительных полевых опытов с севооборотами и бессменными культурами, проведенные в Научно-исследовательском институте полевых культур «Селекция» в Бельцах (НИИПК *Selectia*) показывают, что содержание доступных для растений форм NPK и запасы почвенной воды были выше или, по крайней мере, не ниже, при продолжительных бессменных посевах, чем в почве под различными культурами в севообороте (таблицы 3.4 и 3.5).

Таблица 3.4. Содержание доступных для растений питательных веществ в почве при выращивании различных культур в севообороте и в бессменных посевах (мг/кг сухой почвы), среднее за 1991–1996 гг.

Культуры	Мобильные формы питательных веществ	Севооборот		Бессменные посевы	
		удобренные	неудобренные	удобренные	неудобренные
Озимая пшеница	NO ₃	43.4	46.5	50.2	28.2
	P ₂ O ₅	94.1	67.0	211.9	65.7
	K ₂ O	207.4	188.7	296.3	180.5
Сахарная свекла	NO ₃	74.8	38.9	135.8	68.5
	P ₂ O ₅	88.2	66.9	227.5	62.8
	K ₂ O	197.8	170.8	354.0	183.3
Подсолнечник	NO ₃	73.4	27.7	86.2	55.1
	P ₂ O ₅	85.0	67.8	161.4	62.6
	K ₂ O	224.5	198.9	239.4	172.0
Кукуруза на зерно	NO ₃	116.5	68.8	68.8	48.2
	P ₂ O ₅	105.1	69.1	80.2	56.6
	K ₂ O	227.0	198.8	170.2	147.0

И, тем не менее, дополнительные урожаи, полученные от внесения удобрений, больше в бессменных посевах, чем при севооборотах, и влияние севооборота (разница в урожайности между севооборотом и бессменными посевами) больше на неудобренных участках, чем на удобренных (таблица 3.6).

Таблица 3.5. Весенние запасы доступной почвенной воды (мм) для различных культур, выращиваемых в севообороте и в бессменных посевах, 1991-1996 гг.

Культуры	севооборот		бессменные посевы	
	удобренные	неудобренные	удобренные	неудобренные
Озимая пшеница	288.5	322.9	354.5	342.6
Сахарная свекла	287.4	330.3	298.6	354.5
Подсолнечник	290.3	250.7	328.3	340.2
Кукуруза на зерно	254.2	304.8	354.3	350.9

Другими словами, эффективность использования удобрений выше при непрерывном выращивании в бессменных посевах, чем при севооборотах. Содержание почвенной влаги и питательных веществ практически одинаковы, но эти питательные вещества не так доступны для растений в бессменных посевах. Парадокс может быть объяснен различием в состоянии почвы и здоровья корней в двух противоположных ситуациях; и всегда необходим химический контроль над сорняками, вредителями и болезнями из-за более слабой способности конкурировать с сорняками и подавлять вредителей и болезни в бессменных посевах. Вместо принятия превентивных мер по устранению причин плохого состояния почвы интенсификация земледелия устраняет ее последствия. Пренебрежение здоровьем почвы усиливает зависимость от минеральных удобрений и пестицидов, которые уже не так дешевы, как раньше. В качестве альтернативы мы выступаем за диверсифицированную пищевую цепочку, которая создает благоприятные условия для высокого видового разнообразия и биологической активности почвы.

Состояние почвы может быть оценено двумя простыми измерениями: объемная масса – определяется как сухая масса высушенного в сушильном шкафу известного объема почвы (с указанием общего пространства пор и, следовательно, структуры почвы); и содержание органического вещества в почве – измеряется по потерям массы после прокалывания. Оба измерения необходимо корректировать в соответствии с текстурой почвы, землепользованием и менеджментом (Dent, 2019). Доран и Джонс (Doran and Jones, 1996) предлагают расширенный список индикаторов, которые выводят нас за пределы состояния здоровья почвы (которое находится в руках фермера) и влияют на качество почвы (которое находится в руках богов):

- *Физические свойства:* объемная масса, скорость проникновения воды, стабильность почвенных агрегатов, запасы доступной воды.
- *Химические свойства:* реакция почвы (pH), электропроводность, емкость катионного обмена, общее и доступное для растений содержание NPK.

Таблица 3.6. Урожайность в севооборотах и в бессменных посевах на удобренных и неудобренных участках, 1991-1996 гг., т/га

культуры	севооборот		бессменные посевы		± от севооборота т/га (%)	± от удобрений т/га (%)	
	удобренные	неудобренные	удобренные	неудобренные		севооборот	бессменные посевы
Озимая пшеница	4.49	4.19	3.64	1.70	0.85 (23)	0.30 (7)	1.94 (114)
Сахарная свекла	39.7	32.4	33.6	14.1	6.1 (18)	7.3 (23)	19.5 (138)
Подсолнечник	1.91	1.81	1.66	1.59	0.25 (15)	0.10 (6)	0.07 (4)
Кукуруза на зерно	5.12	5.44	5.32	3.74	-0.20 (-4)	-0.32 (-6)	1.58 (42)

- *Биологические свойства*: органическое вещество почвы, дыхание почвы, углерод микробной биомассы, дождевые черви.

Выбор параметров зависит от условий почвы и управления урожаем, но в большинстве случаев – чем больше ОВП, тем лучше.

Работники сельского хозяйства (фермеры) оценивают состояние почвы в соответствии с их опытом управления почвой и продуктивностью сельскохозяйственных культур. Непосредственная полевая оценка – «проба с лопатой», предложенная немецким ученым Гербингом (*Geribng*), но давно забытая в эпоху механизации, представляет собой визуальную оценку структуры почвы: почва с хорошим плодородием имеет высокое содержание структурных агрегатов в диапазоне 0,2–0,4 см. Хорошая структура означает хорошую аэрацию для гумификации растительных остатков, благоприятные условия для образования клубеньков на корнях бобовых культур и глубокое проникновение корней – все это увеличивает урожайность (*Boincean*, 2016). Рост сорняков является еще одним важным показателем здоровья почвы. В здоровой почве сельскохозяйственные культуры могут сильно конкурировать с сорняками, и эта способность в течение первой трети вегетационного периода имеет решающее значение для достижения высоких урожаев (*Altieri*, 1987).

Зная причины изменения состояния почвы, а также последствия их оценки, фермеры могут предпринять шаги для исправления ситуации. Например, почвы, уплотненные движением почвообрабатывающих орудий и тяжелой техникой, подавляют развитие корней, что препятствует усвоению культурой питательных веществ и воды (Кузнецова, 1977). Снижение ОВП, вызванное интенсивной обработкой почвы и неадекватным возвратом органического вещества в почву, ухудшает структуру почвы и снижает инфильтрацию почвы и способность удерживать влагу, что делает зерновые культуры более чувствительными к кратковременным сухим периодам и к засухе. Кислотность почвы подавляет фиксацию азота клубеньками бобовых культур, что приводит к повышению потребности азота из минеральных удобрений. Отсюда следует, что необходимы шаги для минимизации уплотнения, улучшения структуры почвы, снижения количества обработок почвы и нейтрализации кислотности почвы.

Помимо индивидуальной практики, устойчивое использование земли и управление ею требуют долгосрочных программ на местном и региональном уровнях для согласования финансовых интересов фермеров с сохранением природных ресурсов. Как говорят австралийские фермеры: «Трудно быть зеленым, когда ты находишься в красном». Очевидно, что существует необходимость в улучшении связи между землевладельцами, агрономами, агентствами по распространению знаний и учеными (*Bennett and Cattle*, 2013). Но *Reganold* и другие (2011), оценивая состояние сельского хозяйства в США, пришли к выводу, что обеспечение долгосрочной устойчивости требует не столько принятия простых технологических изменений, сколько пересмотра всей системы. Для такой трансформации, вероятно, понадобятся общественно-политические стимулы, но об этом не может быть и речи. Растет осознание потребителями социальных и экологических последствий практики ведения сельского хозяйства, важности качества продуктов питания, а также условий их выращивания. Исследователи из Школы природных ресурсов в штате Небраска-Линкольн предложили Индекс здоровой фермы для интеграции

биоразнообразия и экосистемных услуг в процесс принятия решений о местном землепользовании, но они также пришли к выводу, что необходима плата за экосистемные услуги для обеспечения устойчивого менеджмента на местном и глобальном уровнях (*Quinn and others*, 2015).

В следующей главе рассматриваются связи между органическим веществом почвы и экосистемными и социальными услугами.

3.4. Органическое вещество почвы и его трансформация в черноземах

До второй мировой войны основные исследования в области сельского хозяйства носили биологический характер (*Albrecht*, 1942; *Howard*, 1943; *Balfour*, 1943; Костычев, 1949; Вильямс, 1950-52). Впоследствии они были дополнены достижениями химической промышленности, приспособленными для удовлетворения военных нужд, и плавно переведены на производство минеральных удобрений и сложных пестицидов. Дух той эпохи определил *G. V. Jacks* (1954), тогдашний директор Федерального Бюро по почвам в Ротамстеде: «Для обеспечения круговорота питательных веществ из мертвых растений обратно в живые необходима очень разнообразная популяция организмов. В качестве альтернативы плодородие почвы могло бы быть поддержано одним очень сложным организмом – человеком, путем непрерывной подкормки... новыми питательными веществами, эквивалентными тем, которые были вынесены растениями». Достижение трехкратного увеличения урожайности основных культур между 1961 и 1985 годами, обусловленного комплексным применением селекции растений, удобрений и значительного расширения ирригации, не может быть опровергнуто. Мальтус был отклонен и *William S. Gaud* из USAID в своей речи 8 марта 1968 года назвал это «Зеленой революцией».

G. V. Jacks смиренно признал, что при всей мощи химии плодородие почвы имеет биологическую природу: «В нормальных условиях требуются действия очень сложной социальной организации живых существ, и чем больше продуктивность почвы, тем сложнее эта организация». Многие из проблем, стоящих сейчас перед обществом, в частности перед сельским хозяйством, происходят от пренебрежения к почве как к живой системе. Почва сама по себе является результатом динамических процессов разложения и синтеза органических остатков под влиянием материнской породы, рельефа, климатических условий и времени (*Jenny*, 1941). Но за последнее столетие – эпоху Антропоцена (*Crutzen*, 2002) – люди стали доминирующим фактором почвообразования. Однако это не улучшило ситуацию.

Помимо агрономической продуктивности, почвы имеют и другие функции, играющие определяющую роль в формировании продукции, но часто упускаемые из виду: хранение, фильтрация и доставка пресной воды; длительное хранение углерода и, следовательно, регулирование климата; среда обитания для биоразнообразия почвы; круговорот и трансформация питательных веществ и отходов. Эти функции зависят от полноценного функционирования почвы, которая адекватно снабжается органическим веществом. Органическое вещество почвы (ОВП) питает всю пищевую сеть в почве, которая зависит от регулярных и существенных поступлений свежего, богатого энергией материала. Его разложение способствует

ет плодородию почвы за счет высвобождения питательных веществ; построения структуры почвы и, таким образом, увеличения инфильтрационной способности, объема доступной воды и сопротивляемости эрозии; питания почвообитающих микроорганизмов, индуцирующих защитные реакции растений против болезней. ОВП – это конгломерат различных органических материалов на разных стадиях разложения: живых организмов, детрита (продукты распада) растений и животных, и побочных продуктов его разложения, обычно называемого гумусом. Исследователи не пришли к единому мнению относительно образования гумуса, за исключением того, что весь гумус в почве – это ОВП, но не все ОВП – это гумус.

При замене естественной растительности, такой, как степной луг или другие многолетние культуры, однолетней растительностью, всегда происходит большая потеря ОВП и выброс парниковых газов. В течение 60 лет под плугом может быть потеряно до трети естественных запасов ОВП (Albrecht, 1938; Кононова, 1963; Лыков, 1977, 1979). В таблице 1.1 приведены обобщенные данные из книги, посвященной 100-летию издания книги Докучаева «Русский чернозем». Они показывают потери гумуса из разных регионов России в диапазоне от 51–71 до 150–180 т/га, ежегодные потери равны 0,5–0,9 т/га, что равносильно истощению 20–70% исходных внутренних запасов ОВП по всему профилю почвы (Ковда, 1983). Первоначально скорость потерь очень высокая, но со временем она уменьшается, и при постоянном использовании и управлении земельными ресурсами может быть достигнуто новое равновесие, зависящее от количества и качества вносимого органического материала, скорости разложения как дополнительно внесенного, так и существующих запасов ОВП, структуры почвы и минералогического состава, а также климата (Тюрин, 1965). Но в случае с черноземом еще нет признаков нового равновесия.

Продовольственная безопасность зависит от восстановления ОВП. Никакая отдельная практика менеджмента не может компенсировать ежегодные потери ОВП пахотных земель, хотя некоторые практические методы могут поддерживать урожайность и улучшать плодородие почвы: агролесоводство, севооборот с многолетними травами, включая выпас в севообороте, использование навоза на ферме, и отсутствие вспашки (*no-till*). Многолетние культуры предотвращают эрозию, обеспечивая круглогодичный растительный покров и сокращая истощение ОВП при обработке почвы. Еще одним преимуществом многолетних культур по сравнению с однолетними является то, что от половины до двух третей их биомассы размещается под землей (Crews and Rumsey, 2017). Они извлекают выгоду из симбиоза между своей корневой системой и грибами микоризы, а глубокая корневая система обогащает подпочву за счет внесения углерода биомассы, а также увеличивает водоудерживающую способность почвы. В то же время урожайность может быть улучшена путем сочетания однолетних и многолетних культур в севообороте.

Время нахождения углерода в подпочве (обычно более 1000 лет) намного больше, чем в поверхностных горизонтах почвы; и отношение C:N является более узким (Rumpel and Kögel-Knabner, 2011), что свидетельствует о том, что органическое вещество в подпочве более подвержено микробному разложению, чем в верхнем горизонте почвы, хотя сам углерод микробной биомассы почвы уменьшается с глубиной. Роль водорастворимого в почве органического вещества была предметом споров между Докучаевым и Костычевым в контексте глубокого гумусового слоя чернозема (Пономарева, Плотникова, 1980). Докучаев придерживался мнения, что

глубокий гумусовый слой обусловлен глубокой корневой системой степных трав, а также выщелачиванием подвижной фракции, тогда как Костычев считал, что глубина верхнего слоя почвы была просто продуктом разложения корневой системы степной растительности.

Общепризнано, что заделка биомассы из корней вносит более значимый вклад в ОВП, чем из надземной части растений. Используя метод стабильных изотопов с корнями *in situ*, Jackson с соавторами (1997) обнаружили, что 45 процентов подземного потребления было превращено в ОВП, и только 8% из надземной части. Влияние корней на формирование ОВП проявляется по-разному из-за их способности связываться с микоризными грибами, а также с экссудатами, которые образуют органоминеральные комплексы и устойчивые агрегаты почвы. ОВП подземного горизонта стабильно, более прочно и имеет более низкую скорость разложения, поэтому мы можем ожидать, что оно будет противостоять распаду в рамках сценария глобального потепления (Fontaine и др., 2007); эта тема дополнительно обсуждается в дальнейшем в связи с обработкой почвы в условиях консервативной системы земледелия (глава 6).

Основное различие между природными экосистемами и агроэкосистемами заключается в количестве энергии (углерода), фиксированной посредством фотосинтеза, по сравнению с количеством энергии, возвращаемой в почву. В природных экосистемах энергия и питательные вещества, добавляемые в почву, по крайней мере эквивалентны тому, что извлекается. Переход от многолетней растительности к однолетней приводит к резкому изменению естественного накопления органического вещества в почве. Данные многолетнего полевого опыта в НИИПК *Seleçtia* в Бельцах показывают, что при переходе к севооборотам достигается лучший баланс между расходом и поступлением питательных веществ и энергии, но даже при этом есть почти 40-процентный дефицит энергии, даже в почве под севооборотом, включающим 30% люцерны при внесении 4,4 т/га компостированного навоза (таблица 3.7). Дефицит энергии колебался от 47 до 53% в севообороте без многолетних бобовых культур и усугублялся при бессменном выращивании (~ 65%), увеличиваясь до 84% в черном пару.

Сельское хозяйство с постоянным дефицитом энергии является неустойчивым, как и все живое. Как фермеры, так и широкая общественность должны быть осведомлены о резком истощении ОВП из-за традиционных методов и о необходимости вернуть его на уровень выше критического путем усиления круговорота питательных веществ энергии, механизмов саморегулирования в почве. А фермерам нужен простой метод для оценки ОВП в начальный период проектирования системы ведения хозяйства: очень важно планирование в начальный период, чтобы избежать ошибок, которые трудно исправить в дальнейшем. Проект устойчивой системы земледелия должен учитывать круговорот энергии (растительных остатков, навоза, покровных культур) и питательных веществ на уровне хозяйства (фермы), что может быть достигнуто путем включения многолетних трав в севооборот, интеграции животноводства и растениеводства. Эти сложные системы могут удовлетворить потребности выращиваемых культур в питательных веществах и скота – в кормах, и в то же время сократить зависимость от промышленных вложений (инпуты). Эта стратегия подробно обсуждается и подтверждается данными длительных полевых опытов в главе об удобрении почвы.

Таблица 3.7. Годовой энергетический баланс в длительных полевых опытах, НИИПК *Selecia*, среднее за 30 лет, 10³ МДж/га (Боинчан, 1999).

Варианты		Выход			Вносятся			Баланс	
		Вынесено с надземной биомассой	Некомпенсированный дефицит органического вещества почвы	Всего	С растительными остатками урожая	С навозом	Всего	±	Годовой дефицит энергии (%)
Севобороты, % пропашных культур	40 (включая также 30% люцерны)	99.3	10.4	109.7	64.8	1.9	66.7	-43.0	39
	50 (включая также 10% черного пара)	95.2	12.4	107.6	50.4	0.3	50.7	-56.9	53
	60	116.9	11.5	128.4	60.2	3.7	63.9	-64.5	50
	70	112.6	14.5	124.1	63.6	2.4	66.0	-58.1	47
Бессменные посевы	Кукуруза на зерно	141.0	16.8	157.8	51.1	4.4	55.5	-102.3	65
	Озимая пшеница	80.3	15.2	95.5	29.4	4.4	33.8	-61.7	65
Черный пар		–	26.9	26.9	0	4.4	4.4	-22.5	84

Как упоминалось выше, при распашке естественной растительности степи ОВП быстро истощается, пока не будет достигнуто новое устойчивое состояние. Новое равновесие определяется системой земледелия. Она должна быть как можно ближе к предшествующему уровню, но для того чтобы достигнуть этого, необходимо также возвращать значительную долю свежего органического вещества. Даже небольшое увеличение общего запаса ОВП, но в присутствии активного органического вещества, значительно улучшает физические свойства почвы (Powlson and others, 2011). В таблице 3.8 обобщены данные по запасам подвижных форм С и N и их доля в общих запасах С и N в верхнем горизонте почвы (0-20 см) для залежи, черного пара, бессменных посевов озимой пшеницы и кукурузы, а также в различных севооборотах. Эти результаты получены в многолетнем полевом эксперименте на типичном черноземе в Бельцах. При различных условиях возделывания доля подвижного ОВП колеблется от 6,1 до 26,8 т/га углерода и составляет от 11 до 37% от общего запаса углерода в верхнем слое почвы (0-20 см). Наименьший запас подвижного углерода наблюдался в черном пару (6,1 т/га), где также отмечена наименьшая доля общего запаса углерода в почве в пахотном горизонте (11%). Наибольший запас подвижного С (26,8 т/га, 37% от общего запаса углерода) наблюдался в севообороте с 60% пропашных культур, где было внесено самое большое количество навоза (12 т/га севооборота).

Таблица 3.8. Содержание и запасы подвижного углерода и азота и их доля в общих запасах органического вещества почвы в горизонте 0-20 см на удобренных делянках, 1996 (количество подвижного ОВП было определено по методу *Cambardella* (Боинчан, 1999)

Показатели	Залежь	Черный пар	Озимая пшеница	Кукуруза	Севооборот			
					40%	50%	60%	70%
Запасы подвижной фракции ОВП (т/га)	18.1	6.1	19.5	12.8	19.5	16.4	26.8	15.5
Запасы подвижной фракции в общем запасе углерода (%)	24.0	11.1	27.3	18.6	26.7	25.8	36.5	23.6
Запасы подвижной фракции азота (т/га)	1.34	0.38	0.46	0.58	0.50	0.86	0.79	1.02
Запасы подвижной фракции в общем запасе азота (%)	19.0	7.4	7.0	8.9	8.1	14.4	12.7	16.3

В подвижной фракции ОВП содержится азот, который эквивалентен 0,38–1,34 т N/га для окультуренного типичного чернозема Бельцкой степи и составляет от 7 до 19 процентов от общего запаса N в слое почвы 0–20 см. Самые низкие запасы подвижной фракции N определены под черным паром (0,38 т/га или 7% от общего запаса N).

Наибольшие запасы лабильного N были определены под залежью (заложен в 1984 году) – 1,34 т/га или 19% от общего запаса азота. Большой запас подвижного N и более высокая доля подвижной фракции в общих запасах N наблюдаются в севооборотах с 50 и 70 процентами пропашных культур по сравнению с запасами в севооборотах с 40 и 60% пропашных культур; севооборот с 50% пропашных культур, включая 10% черного пара с внесением небольшого количества навоза (0,7 т/га); в севообороте с 70 процентами пропашных культур внесено больше навоза (6,1 т/га). Тем не менее, агрономическая продуктивность сельскохозяйственных культур схожа, возможно, из-за саморегулирующей способности почв производить урожай путем перераспределения внутренних ресурсов. Однако эта саморегулирующая способность является ограниченной, потому плодородие и структура почвы снижаются, что приводит к уплотнению и уменьшению инфильтрации воды. Как мы уже указывали, урожайность может ввести в заблуждение в отношении плодородия почвы.

В этом долгосрочном опыте среднегодовой вклад C был рассчитан с использованием растительных остатков сельскохозяйственных культур и навоза за период с 1962 по 1991 год на экспериментальных участках с различными севооборотами и бессменными культурами (таблица 3.9). В бессменных посевах кукурузы на зерно большее количество C не способствует увеличению запаса подвижного C или N; запасы подвижных фракций ОВП определяются биохимическим составом растительных остатков и других органических остатков, а также комплексным действием и взаимодействием биотических и абиотических факторов. В дополнение к общему количеству подвижных фракций C и N соотношение C:N в подвижной фракции ОВП сравнивалось с соотношением в исходных образцах почвы и в органоминеральных фракциях после удаления C лабильной фракции органического вещества почвы (СТОВ) (таблица 3.10).

Таблица 3.9. Годовые поступления углерода в виде растительных остатков и навоза в севооборотах с различным соотношением пропашных культур и в бессменных посевах в длительных полевых опытах, НИИПК *Selectia*, среднее за 1962-1991 гг., т/га

Севообороты, доля пропашных культур				Бессменные посевы	
40% (с 30% люцерны)	50% (с 10% черного пара)	60%	70%	Озимая пшеница	Кукуруза на зерно
25.0	19.1	30.0	26.9	25.3	32.9

Эти данные показывают относительно стабильное соотношение C:N в исходных образцах почвы и в органоминеральных фракциях, но большую разницу в лабильных фракциях ОВП. Соотношение C:N варьировало от 10,3 до 11,8 в

исходном образце почвы; от 8,5 до 10,2 – для органоминеральной фракции, но от 13,5 до 42,5 – для лабильной фракции ОВП. Минерализация ОВП в отношении как С, так и N тесно коррелировала с величиной поступлений свежих растительных остатков культур ($x = 0,987$ и $z = 0,989$, соответственно). Другими словами, чем больше поступление свежего органического вещества, тем больше потери от минерализации. Кроме того, скорость минерализации С в 1,4-2,6 раза выше, чем у N, и, опять же, на нее сильно влияет химический состав растительных остатков и других органических веществ.

Таблица 3.10. Соотношение C:N в образцах почвы в слое 0 – 20 см, а также в лабильных и органо-минеральных фракциях ОВП на удобренных полях под залежью, черным паром, бессменными посевами и в севооборотах, 1996 г.

Показатели	Залежь	Бессменные посевы			Севообороты			
		Черный пар	Озимая пшеница	Кукуруза на зерно	40%	50%	60%	70%
C:N в подвижной фракции ОВП	13.5	16.2	42.5	22.4	39.0	19.0	33.8	14.9
C:N в органо-минеральной фракции ОВП	10.0	10.2	8.5	9.6	9.4	9.2	8.5	9.4
C:N в исходных образцах почвы	10.6	10.7	10.9	10.7	11.8	10.7	11.8	10.3

Поступление органических остатков с широким соотношением C:N приводит к иммобилизации N с большими неэффективными потерями C. Напротив, поступление органических остатков с узким соотношением C:N может привести к неэффективному использованию и потерям N из-за недостатка C для эффективного закрепления почвой. Таким образом, существует оптимальное соотношение между биологическим и синтетическим (из минеральных удобрений) N в общем количестве, поглощаемом сельскохозяйственными культурами. Данные длительных опытов показывают, что в случае черноземных почв это соотношение составляет 80:20, что означает, что N из минеральных удобрений можно эффективно использовать только в том случае, если почва содержит оптимальное количество N в форме, доступной для сельскохозяйственных культур и органических остатков почвы (Боинчан, 1999).

Термогравиметрический анализ гуминовых кислот из почвы на опытных полях указывает на широкий разброс лабильных и стабильных фракций ОВП. Подвижная фракция ОВП (алифатические и, преимущественно, периферические компоненты) разрушается при температуре 200-400 °C. Стабильная фракция ОВП, содержащая ароматические компоненты является более устойчивой, и может разрушаться при температуре > 400 °C. Чем больше свежих органических остатков попадает в почву, тем выше доля алифатических и меньше доля ароматических компонентов; тогда как под черным паром ароматические компоненты доминируют в структуре гуминовых кислот. Это означает, что регулярное поступление

свежего органического вещества, наряду с сокращением потерь ОВП в результате минерализации, является основным требованием устойчивого менеджмента черноземов, равно как и устранение черного пара (*Boincean* и др., 2014).

Широко распространено мнение, что растворенный органический углерод (РОС) является хорошим показателем лабильной фракции ОВП (*Ganjara*, 1988; *Gregorich* и др., 1994; Боинчан, 1999). На основе исследования, проведенного в Онтарии (Канада) *Gregorich E.G.* обнаружил, что РОС тесно коррелирует с углеродом микробной биомассы (СМБ) и может использоваться в качестве индикатора биологической активности почвы. *Sparling* (1992) предложил соотношение между СМБ и общим органическим углеродом почвы (ПОС) в качестве чувствительного метода определения изменений ОВП, потому что оно отражает поступление свежего органического вещества, эффективность преобразования в микробный углерод или возможные потери и стабилизацию лабильной фракции минералами почвы. Углерод микробной биомассы (СМБ) составляет всего 1-5 процентов от общего количества ПОС, но он является генератором почвы. Он может использовать более доступный С из корневых экссудатов и, таким образом, может минимизировать вымывание нитратов из почвы. Он также представляет предмет конкуренции за N между корнями сельскохозяйственных культур и почвенными микроорганизмами.

Ganjara (1988) оценил влияние ОВП на урожайность растений на дерново-подзолистых почвах и выщелоченном черноземе, но на удобренных делянках двух типов почв он не обнаружил никаких последовательных изменений свойств почвы (объемной массы, общей пористости, макроагрегатной и микроагрегатной структуры, численности микроорганизмов и т. д.), связанных с содержанием гумуса (1,6-3,1% и 3,5-5,5% соответственно), а также никакого – влияния на урожайность растений. Содержание и состав подвижной фракции ОВП были более важны для агрономической продуктивности. Годовой уровень разложения (15–30% для лабильной фракции ОВП) тесно коррелировал с доступным для растений запасом N и урожайностью. Несколько важных свойств почвы определяются непосредственно на границе раздела корень-почва, включая наличие питательных веществ и структуру почвы.

3.5. Структура почвы – наиболее показательный индикатор плодородия черноземных почв

В своей книге «Наши степи прежде и теперь» Докучаев подчеркивал причины деградации чернозема: потеря естественной растительности степного и войлочного поверхностного покрова, которые сохраняют воду и защищают почву от стихии, усугубляется потерей зернистой структуры целинной почвы (Докучаев, 1948). Наблюдая за тем, как в некоторых регионах распаивается до 90 процентов степей, он утверждал, что государственной поддержки науки и закупок современного оборудования недостаточно для предотвращения деградации земель. Он подчеркнул необходимость сильной воли, знаний и понимания, а также управления земельными ресурсами со стороны владельцев и пользователей земли. Современник и соратник Докучаева по изучению степей Измаильский также написал широко известную книгу «Как высохла наша степь», в которой он посчитал засуху, скорее, как следствие состояния поверхности почвы, чем недостаточного

количества осадков. Одинаковое количество осадков может привести к различным результатам на почвах с растительным покровом из мульчи в отличие от голой уплотненной поверхности почвы: меньшая водопроникающая способность почвы оказывает тот же эффект, что и меньшее количество осадков, поэтому важно знать не только количество осадков для каждой местности, но также и количество, которое проникает в почву. Кроме того, почвы без защитной мульчи теряют много воды в результате испарения. По его мнению, чем больше мы принимаем существующее печальное состояние почвенной поверхности степей, тем ближе мы подходим к пустыне (Измаильский, 1937).

Как ОВП, так и структура почвы имеют решающее значение для функционирования почв. На почве с хорошей структурой благоприятная среда обитания почвенной биоты является источником многих экосистемных услуг: фильтрация и доставка пресной воды, секвестрирование углерода, круговорот питательных веществ и трансформация отходов и токсинов. Роль почвенной биоты в значительной степени игнорируется, но для достижения устойчивого сельского хозяйства необходимо лучшее понимание этого невидимого мира (*Kennedy and Smith*, 1995). Ухудшение структуры почвы является результатом отрицательного годового баланса ОВП, а также использования тяжелой техники в начале весны, когда почвы влажные и физически несозревшие. Деградация структуры почвы приводит к уплотнению, которое является серьезной проблемой повсеместно на пахотных почвах. Это значительно снижает скорость инфильтрации воды и способность накапливать почвенную влагу; корни не могут проникать глубоко в почву и повреждаются корневой гнилью; продуктивность культур находится под угрозой; почва становится более уязвимой для эрозии и засухи (*Hamza and Anderson*, 2005). Структура почвы особенно важна в засушливых регионах, поскольку дефицит воды снижает минерализацию азота и доступность его для роста сельскохозяйственных культур, а также нарушает круговорот N с C, P, S и других макро- и микроэлементов (*Delgado-Baquerizo* и др., 2016).

Огромную роль в трансформации ОВП играют дождевые черви. Чарльз Дарвин (1881) в своем бестселлере «Образование растительной плесени под действием червей» подчеркнул важность дождевых червей в проглатывании и обработке почвы – верхний слой почвы проходит через их кишечник много раз. Три основных группы дождевых червей питаются растительным детритом: *эпигейчные* виды, обитающие в подстилке и откладывающие продукты своей жизнедеятельности на поверхности почвы; *анекозовые*, обитающие в вертикальных норах до метра и более, которые соединяются с поверхностью почвы, и *эндогенные* виды, обитающие в более глубоких слоях и делающие горизонтальные норы. Деятельность дождевых червей усиливает образование водостойких структурных агрегатов, инфильтрацию воды и дренаж. Они стимулируют микробиологические процессы, измельчая растительные остатки и смешивая их с частью почвы; вносят вклад в секвестрацию C в почве, втягивая растительные остатки с поверхности почвы и смешивая их с минералами через весь профиль почвы (*Jackson and others*, 1997). Все эти действия резко подавлены в результате обработки почвы.

Blouin и др. (2013) также документируют вклад дождевых червей в функционирование почв; они наблюдали экспоненциальное снижение скорости эрозии почв с увеличением биомассы анекозовых дождевых червей. Дождевые черви

также влияют на минерализацию ОВП; азот выделяется непосредственно дождевыми червями в качестве продукта их метаболизма и косвенно – благодаря улучшению физических свойств почвы и измельчению растительных остатков. Общеизвестно, что активность и видовое разнообразие дождевых червей в большей степени увеличивается за счет компоста и навоза, чем за счет минеральных удобрений. Johnston и др. (2003) в Ротамстеде сообщили о более высоком использовании Р различными культурами, даже на участках с более низким содержанием ОВП, но с лучшей структурой почвы.

Вернадский (1967) писал, что химия почвы является специфическим проявлением общих биохимических процессов, осуществляемых живыми компонентами почвы. Поскольку почвенная биота играет большую роль в формировании почвенных агрегатов, особый интерес представляют стабильные органические вещества почвы (СОВП). Результаты длительных полевых опытов на типичном черноземе в Бельцах показывают более широкое отношение С:N для СОВП, чем для других фракций почвы, что может быть связано с различным соотношением между почвенными грибами и бактериями. Грибы имеют более высокую эффективность использования углерода и, следовательно, накапливают больше углерода в почве, чем бактерии. Бактерии ответственны за более узкое соотношение С:N в органоминеральной фракции почвы. Тем не менее, не так много проведено исследований о важности микоризы для накопления и стабилизации ОВП, а также для доступности воды и питательных веществ, особенно для Р. В своем обзоре «Микориза и структура почвы» Rillig и Mummey (2006) сосредоточили свое внимание на роли грибов арбускулярной микоризы (ГАМ) в формировании структуры почвы на разных иерархических уровнях: в растительном сообществе, отдельном корне и в почвенном мицелии. Как корневые экссудаты, так и грибковые продукты участвуют в образовании почвенных агрегатов и в их стабилизации. ГАМ являются важным источником пищи в пищевой цепочке почвы, особенно для микрочленистоногих, а выделяемый ГАМ гломалин стабилизирует почвенные агрегаты. В засушливых регионах корневая биомасса может быть в 10-20 раз выше, чем наземная биомасса, и микоризные ассоциации увеличивают поглощение воды, а также питательных веществ из слабо доступных форм (Гиляров и Криволицкий, 1985).

Cambardella и Elliott (1993) отметили, что вспашка целинных почв приводит к быстрой потере СОВП и, следовательно, к снижению структурной устойчивости почвы. Чрезмерная обработка почвы также способствует ухудшению макроагрегатов почвы, которые содержат большую часть лабильной фракции. Нарушение структуры почвы с доминированием микроагрегатов и истощением питательных веществ, доступных растениям, может помочь объяснить меньшую продуктивность почв с длительной распашкой по сравнению с недавно вспаханной целинными почвами; Соколовский (1956) назвал их «выпаханными почвами». Одним из преимуществ бесплужного земледелия является более быстрое накопление СОВП с более высоким отношением С:N, так что грибы доминируют в разложении остатков сельскохозяйственных культур на поверхности почвы. Бактерии, напротив, доминируют в разложении, когда растительные остатки попадают в почву (Beare и др., 1994). Установлено, что физически стабилизированное СОВП, поглощенное в почвенных агрегатах, имеет более высокое содержание С и N и может считаться более разложенным, чем свободное ОВП (Six и др., 1998, 2000, 2002).

3.6. Заключение

- После раскорчевки лесов и распашки целинных почв ежегодная вспашка привела к серьезной физической, химической и биологической деградации почв с потерей способности предоставлять экосистемные и социальные услуги. Уменьшение площадей под лесами и лугами является одной из основных причин повышения уязвимости к наводнениям и засухе.
- Большое разнообразие культур в севооборотах увеличивает способность корневой системы поглощать питательные вещества и воду из почвы. Это снижает зависимость фермеров от индустриальных вложений (инпутов) для питания сельскохозяйственных культур и защиты их от сорняков, вредителей и болезней. Низкое качество почвы должно быть компенсировано дорогостоящими внешними вложениями.
- Органическое вещество почвы является надежным интегральным показателем плодородия почвы. За последнее столетие произошло сокращение запасов ОВП на 40-50% по всему профилю почвы; относительно целинных почв, потеря была еще больше. Потери продолжаются из-за повышенной минерализации, вызванной интенсивной обработкой почвы и недостаточным количеством возвращаемых в почву органических остатков и навоза.
- Сельское хозяйство не может продолжаться с постоянным дефицитом почвенных энергоресурсов. Необходимо принять меры, чтобы компенсировать этот дефицит.
- Лабильная фракция органического вещества почвы является наиболее активной и в большей части способствует регулярному высвобождению питательных веществ для растений. Запасы лабильного С выше в севооборотах с многолетними травами и значительным внесением навоза на ферме.
- Урожайность не коррелирует с общим содержанием ОВП или даже с его мобильной подвижной частью. Биохимический состав, скорость разложения и способность высвобождать питательные вещества являются наиболее важными факторами формирования урожая. Однако, чем больше поступление свежего органического вещества, тем больше минерализуется ОВП и, следовательно, способность почвы удовлетворять потребность растений в питательных веществах. Таким образом, устойчивый менеджмент черноземов требует регулярного внесения свежего органического вещества, наряду с сокращением потерь ОВП в результате минерализации.
- ОВП и структура почвы имеют решающее значение для функционирования почвы. Сельское хозяйство, которое пренебрегает структурой почвы, вполне может превратить степи и прерии в пустыню.

Список литературы

- Albrecht W 1938 Loss of soil organic matter and its restoration. 347-360 in *Soils and men. Yearbook of Agriculture*. US Dept Agriculture, Washington DC
- Albrecht W 1942 Soil Fertility and the human species. *Chemical and Engineering News*. American Chemical Society, Washington DC
- Altieri MA 1987 *Agroecology: the scientific basis of alternative agriculture*. Westview Press, Boulder CO

- Bai ZG, DL Dent, L Olsson & ME Schaepman 2008 Proxy global assessment of land degradation. *Soi Use and Management* 24, 223-234
- Bai ZG, DL Dent, L Olsson, AE Tengberg, CJ Tucker & GT Yengoh 2015 A longer, closer look a land degradation. *Agriculture for Development* 24, 1, 3-9
- Balfour Lady EB 1943 *The living soil. Evidence of the importance of human health from soil vitality with special reference to natural planning*. Faber and Faber, London
- Beare MH, ML Cabrera, PF Hendrix and DC Coleman 1994 Aggregate – protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal* 58, 3, 787-795
- Bennett J and S Cattle 2013 Adoption of soil health improvement strategies by Australian farmers. I Attitudes, management and extension implications. *Journal of Agricultural Education and Extension* 19, 4, 407-426
- Blouin M, E Hodson, G Delgado and others 2013 A review of earthworms' impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science* 64, 2, 161-182
- Boincean BP 2014. Fifty years of field experiments with crop rotations and continuous cultures at the Selectia Research Institute of Field Crops. 175-299 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht
- Boincean BP 2015 The scientific basis for ecological restructuring of agriculture on the steppes. *Agriculture for Development* 24, 26-31
- Boincean BP 2016 Sustainable farming systems for soil conservation and resilience to climate changes. *ESSC Conference in Cluj-Napoca, Romania, June 15-18*
- Boincean BP, LI Bulat, MA Bugaciuc and others 2014 Quality of soil organic matter under crop rotations and continuous cultures. 261-266 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht.
- Boincean B and C Francis 2017 Agroecological rotation designs reduce dependence on industrial inputs. *Agroecology and sustainable food systems* 41, 9-10, 1068-1080
- Boonman J and others 2015 Light fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization. *Soil Biology and Biochemistry* 26, 1459-1468
- Cambardella CA and ET Elliott 1992 Particulate soil organic matter change across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56, 3, 777-783
- Chendev YG, TJ Sauer, GH Ramirez and CL Burras 2015 History of East European Chernozem soil degradation: protection and restoration by tree windbreaks in the Russian steppe. *Sustainability* 7, 705-724
- Crews TE and BE Rumsey 2017 What agriculture can learn from native ecosystems in building soil organic matter. A review. *Sustainability* 9, 3-18
- Crutzen P, A Mosier, K Smith and W Winiwarter 2008 N₂O release from agro-biofuel production negates warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8, 2, 389-395
- Culman S, S Snapp and L Gentry 2013 Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance. *Agronomy Journal* 105, 493-502
- Darwin CR 1881 *The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits*. John Murray, London
- Delgado-Baquerizo M, J Grinyer, P Reich and B Singh 2016 Relative importance of soil properties and microbial community for soil functionality: insights from a microbial swap experiment. *Functional Ecology* 2-12
- Dent DL 2019 *Assessment of soil health*. Draft British Standard, in preparation
- Dokuchaev VV 1883. *Russian chernozem*. Independent Society for Economics, St Petersburg. *Second edition with foreword by VR Williams*, 1952. State Publisher for Agricultural Literature, Moscow (Russian, English translation 1967 Israeli Program for Scientific Translations, Jerusalem)
- Doran J & M Zeiss 2000 Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15, 3-11
- Doran J, M Sarantonio & M Liebig 1996 Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy* 56
- Fontaine S, S Barot, P Barré and others 2007 Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature Letters* 450, 277-281

- Glover J, C Cox & J Reganold 2007 Future farming: a return to roots? Large-scale agriculture would become more sustainable if major crops plants lived for years and built deep root systems. *Scientific American* 82-89
- Gregorich EG, CF Drury & J Beldock 2001 Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation. *Canadian Journal of Soil Science* 81, 21-31
- Hamza M & W Anderson 2005 Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Research* 82, 121-145
- Hooke R & JF Martin-Duque 2012 Land transformation by humans: a review. *GSA Today* 22, 12, 4- 9.
- Howard Sir A 1943 *An agricultural testament*. Oxford University Press
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC 2013 *Harmonised world soil database*. FAO, Rome and IIASA, Laxenberg
- IUSS Working Group WRB 2015 *World reference base for soil resources, update 2015*. FAO World Soil Resources Report 106, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Jacks GV 1954. *Soil*. Nelson, Edinburgh
- Jackson W 1981 *Call for a revolution in agriculture*. First Annual EF Schumacher Lecture, Mount Holyoke College, South Hadley MA
- Jackson RB, HA Mooney and ED Schulze 1997 A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient content. *Proc. National Association of Sciences* 94, 14, 7362-7366
- Jenkinson D, P Poulton, A Johnson & D Powlson 2014 Turnover of nitrogen¹⁵-labeled fertilizer in old grassland. *Soil Science Society of America Journal* 68, 865-875
- Jenkinson D & J Rayner 1977 The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science* 123, 298-305
- Jenny H 1941 *The factors of soil formation – a system of quantitative pedology*. Dover Publications, New York
- Kennedy A & K Smith 1995 Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. *Plant and Soil* 170, 1, 75-86
- Kraemer R, AV Prishchepov, D Müller and others 2007 Long-term agricultural land-cover change and potential for crop land expansion in the former virgin lands area of Kazakhstan. *Environment Research Letters* 10, 5
- Krupenikov IA, BP Boincean & DL Dent 2011 *The black earth. Ecological principles for sustainable agriculture on chernozem soils*. Springer, Dordrecht.
- Lal R 2004 Carbon emission from farm operations. *Environment International* 30, 981-990
- Leopold A 1987 *A Sand County almanac and sketches here and there*. Oxford University Press, New York.
- Liu C, M Lu, J Cui and others 2014. Effects of straw-carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. *Global Change Biology* 20, 5, 1366-1381
- Mikhailova EA, RB Bryant, II Vassenev and others 2000 Cultivation effects on soil carbon and nitrogen contents at depth in the Russian chernozem. *Soil Science Society of America Journal* 64, 738-745
- Moon D 2008 *The Russian steppes: an environmental history*. CRCEES Working papers, Toronto
- Moon D 2013 *The plough that broke the steppes. Agriculture and environment on Russia's grasslands 1780-1914*. Oxford University Press.
- Powlson DS, PJ Gregory, WR Whalley and others 2011 Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy* 36, 72-87
- Quinn A, J Fernando & D Georgia 2015 Dissecting the ecosystem service of large-scale pollutant retention: the role of wetlands and other landscape features. *Ambio* 44, 1, 127-137
- Reganold J, D Jackson-Smith, S Batie and others 2011 Transforming US agriculture. *Policy Forum. Science* 332, 6030, 670-672
- Rillig MC & DL Mummey 2006 Mycorrhizas and soil structure. *Tansley review. New Phytologist* 171, 1, 41-53
- Rumpel C & I Kögel-Knabner 2011 Deep-soil organic matter – a key but poorly understood component of the terrestrial carbon cycle. *Plant and Soil* 338, 1-2, 143-158
- Six J, E Elliott, K Paustian & J Doran 1998 Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* 62, 1367-1377

- Six J. E Elliott & K Paustian 2000 Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for carbon sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 2099-2103
- Six J, R Conant R, E Paul & K Paustian 2002 Stabilization mechanisms of soil organic matter implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241,155-176
- Soil Survey Staff 2017 *Keys to soil taxonomy, 12th edition*. United States Dept Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington DC
- Sparling GP 1992 Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research* 30, 195-207
- Боинчан Б.П. Экологическое земледелие в Республике Молдова (Севобороты и органическое вещество). Кишинев: Штиинца, 1999. 299 с.
- Вернадский В. Биосфера (избранные труды по биогеохимии). М.: Мысль, 1967. 376 с.
- Вильямс В.Р. Избранные труды, тома 5-10. М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1950-1952.
- Ганжара Н.Ф. Гумусообразование и агрономическая оценка органического вещества подзолистых и черноземных почв Европейской части СССР. Автореферат дисс. д-ра биол. наук. М.: МСХА, 1988. 31с.
- Гиляров М.С., Криволуцкий Д. Жизнь в почве. М.: Молодая гвардия, 1985. 191 с.
- Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь. 1892 г. // Собрание сочинений. Под редакцией и с предисловием В. Р. Вильямса, З.С. Филипповича. М.- Л.: Сельхозгиз. 1936.
- Измаильский А. А. Как высохла наша степь. Предварительное сообщение о результатах исследований влажности почвы в Полтавской губернии в 1886–1893 гг. М.-Л.: ОГИЗ. Сельхозгиз, 1937. 76 с.
- Кононова М. Н. Органическое вещество почвы, его природа, свойства и методы изучения. М.: Издательство: АН СССР, 1963. 314 с.
- Костычев П. Почвы Черноземья в России. Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. Москва, 1949.
- Кузнецова И. Агрофизические свойства дерново-подзолистых почв. //Почвоведение. № 9. 1977 с. 48-57.
- Лыков А.М. Органическое вещество почвы и плодородие дерново-подзолистых почв в условиях интенсивного сельского хозяйства. Диссертация, д-р сельскохозяйственных наук. Москва, 1977.
- Лыков М. К. К методике расчетного определения гумусового баланса почвы в интенсивном земледелии. // Известия ТСХА, 1979. № 3, с. 21-34.
- Пономарева В. В., Плотникова. Гумус и почвообразование (методы и результаты исследований). Л.: Наука, 1980. 222 с.
- Раменский Л. Избранные работы. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Л.: Наука, 1971. 334 с.
- Русский чернозем - 100 лет после Докучаева. (ред. Ковда В.А.). М.: Наука, 1983. 300 с.
- Соколовский А.Р. Сельскохозяйственное почвоведение. М.: Сельхозгиз, 1956. 335 с.
- Сукачев В. Н. Растительные сообщества. (Введение в фитоценологию). М.-Л. 1928. 232 с. // Избранные произведения. Т. 3. М.-Л.: Наука, 1975.
- Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 320 с.

СЕКВЕСТРАЦИЯ (СВЯЗЫВАНИЕ) УГЛЕРОДА И ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

*Тебе известно уже достаточно. И мне тоже. Нам не хватает не знаний.
Нам не хватает смелости понять то, что мы знаем, и сделать выводы.*

Уничтожьте всех дикарей.
Свен Линдквист (Sven Lindqvist), 1992

Аннотация. Поглощение углерода связывает три важнейшие для общества проблемы: деградацию земель, устойчивое развитие и изменение климата. Изменение климата обусловлено выбросами парниковых газов в атмосферу: основной движущей силой является увеличение выбросов CO_2 в результате изменений в землепользовании и сжигания ископаемого топлива. Между 1850 и 1998 гг. они составляли 136 ± 30 и 270 ± 30 Гт С (гигатонн C_2 -эквивалента) соответственно; текущие годовые выбросы составляют соответственно около 1,6 и 7 Гт С. Минерализация почвенного органического углерода способствовала этому в еще большей мере: замена многолетней растительности однолетними культурами на черноземе привела к потере 30–70% исходных запасов почвенного углерода (ПОС). Потери были самыми большими при разрушении дерна, но они все еще значительны, потому что в пахотных почвах годовые поступления органического вещества не соответствуют годовым потерям. В долгосрочных полевых опытах использование исключительно только минеральных удобрений удваивало ежегодные потери ПОС по сравнению с неудобренными участками, а потери в подпочве превышали потери от верхнего слоя почвы: 66–72% по сравнению с 28–34% соответственно. Все эти потери ускоряются орошением.

Почти все черноземы, безусловно, останутся пахотными землями, но выбросы можно сократить или даже обратить вспять, сократив применение энергозатратных промышленных инпутов (вложений), а именно: биологическая фиксация азота вместо азотных минеральных удобрений, севооборот для сокращения использования пестицидов и нулевая обработка почвы. Многолетние полевые эксперименты на черноземе в Канаде, сопоставляющие многолетние посевы разных культур с пшеницей, дали среднее увеличение запасов ПОС в слое почвы 0–30 см на 0,6 тС/га/год; отказ от чередующегося черного пара в пользу непрерывного посева увеличил запасы на 0,23 тС/га/год; выигрыш от нулевой обработки почвы составил 0,14 тС/га/год для верхнего 15-сантиметрового слоя почвы.

Ключевые слова: связывание (секвестрация) углерода, изменение климата, земледелие с использованием отвального плуга, длительные полевые опыты, выбросы CO_2 , минерализация органического углерода в почве, нулевая обработка, черный пар.

4.1. Введение

Глобальное потепление обусловлено парниковыми газами в атмосфере – в основном водяными парами, углекислым газом (CO_2), метаном (CH_4) и окислами азота (N_2O). Водяной пар и CO_2 , безусловно, оказывают наибольший эффект, но само количество водяного пара зависит от температуры атмосферы и океанов, поэтому мы считаем, что основной движущей силой изменения климата является наращивание выбросов CO_2 в связи с изменениями в землепользовании (вырубка лесов и постоянная обработка почвы), а также сжигание ископаемого топлива. В период с 1850 по 1998 год эти выбросы составили 136 ± 30 и 270 ± 30 Гт соответственно (Гт – одна тысяча миллионов метрических тонн). Недавние ежегодные выбросы из этих же источников составили около 1,6 и 7 Гт С, соответственно. Из этого общего количества 3,5 Гт С остается в атмосфере, 2,3 Гт С поглощается океанами, а остальная часть – другим не идентифицированным поглотителем (IPCC, 2010).

Связывание углерода – это перенос углерода из атмосферы в другие хранилища. Есть две стратегии: *абиотическая* и *биотическая*. Первая является привлекательной, поскольку ее емкость хранения не ограничена, но она включает в себя недоказанные и технически сложные океанические и геологические закачки чистого CO_2 , очистки и карбонизации минералов; это дорого с точки зрения финансовых затрат и потребления энергии; к тому же, абиотическая стратегия не решает первопричину, скорее, стремится смягчить последствия (Lal, 2004). Лучше бороться с избытком CO_2 в атмосфере с помощью устойчивых систем земледелия, которые улавливают углерод путем фотосинтеза и сохраняют его в виде живой биомассы и органического углерода в почве (ПОС), а также сокращают выбросы от сжигания ископаемого топлива. Эта стратегия противостоит глобальному потеплению по двум причинам: во-первых, использование меньшего количества промышленных ресурсов сокращает первичные выбросы парниковых газов; во-вторых, увеличение ПОС выводит углекислый газ из атмосферы, хранить углерод в почве выгоднее.

Запас почвенного углерода в 4,4 раза больше, чем в живых организмах, и в 3,3 раза больше, чем в атмосфере. Помимо смягчения последствий изменения климата, улавливание биологического углерода приводит к улучшению качества почвы и воды, увеличению биоразнообразия, повышению урожайности и ко многим другим преимуществам, которые помогают адаптации к глобальному потеплению. Киотский протокол в Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН 1997, 2012) способствовал торговле углеродными кредитами, которые представляют собой подтвержденное сокращение выбросов парниковых газов или их удаление из атмосферы. Была надежда, что торговля выбросами поможет быстрее

и с меньшими затратами сократить выбросы, чем иным способом. Вначале только углерод, улавливаемый вегетирующей растительностью – обычно деревьями – учитывался, и политика предусматривала, что фермеры в развивающихся странах будут продавать углеродные кредиты с более высоким уровнем индустриального, промышленного развития. Хранение углерода в почве делает все то же самое для общества, и, возможно, это более стабильный резервуар углерода, но в настоящее время только схема компенсации углерода в Альберте (Канада) пошла по этому пути (см. главу 8).

С тех пор как Черная земля была распахана, ее запас ПОС сократился на 30–70 процентов и все еще истощается. В естественных экосистемах вход (поступления) и выход (вынос) находятся в равновесии, но при обработке почв вводимые ресурсы значительно меньше, чем выносимые (не только при разрушении дерна), но и всегда. Здесь мы оцениваем возможности восстановления запасов ПОС под пахотными культурами, хотя также необходимо учитывать важную роль деревьев и сохранение водно-болотных угодий в более обширном ландшафте. Роль водно-болотных угодий в улавливании и хранении углерода игнорировалась в эпоху обширных ирригационных и дренажных систем, что почти всегда приводило к деградации земель. Поэтому было бы разумно рассмотреть все возможности восстановления водно-болотных угодий. Введение деревьев и кустарников в системы земледелия дает доказанные преимущества для ПОС; они могут быть интегрированы в системы земледелия как прибрежные буферные полосы, полезащитные лесополосы и как лесопастбища. В тропическом Квинсленде (Австралия) на больших пастбищных угодьях высаживают близко расположенные живые изгороди кустарниковых растений Леуцена (*Leucaena*). Некоторые органы власти считают, что потенциал агролесоводства для улавливания углерода в виде надземной и подземной биомассы выше, чем для пастбищ и полевых культур.

Восстановить запасы гумуса вполне возможно, что мы продемонстрируем на основе результатов длительных полевых опытов в США, Канаде и в Бельцкой степи в Молдове. В каждом случае потери являются самыми большими в первые 20–25 лет, и скорость потерь уменьшается, когда система переходит в устойчивое состояние, в котором количество минерализованного органического вещества почвы (ОВП) равно вновь гумифицированному ОВП. Баланс достигается на гораздо более низком уровне, чем в естественной степи или прерии из-за резкого сокращения поступления органического вещества с растительными остатками по сравнению с естественной экосистемой. Следует различать два понятия: продолжительность поглощения (секвестрации) углерода и насыщение углеродом – уровень, при котором почва больше не может накапливать углерод (Paustian и др., 2000; Stewart и др., 2007; West and Six, 2007). Уровень секвестрации вначале выше, потом снижается по мере приближения почвы к насыщению (равновесию). С экономической точки зрения достижение насыщения углеродом является проблематичным – для этого требуется очень высокое поступление углерода, и чем ближе система к насыщению, тем меньше накапливается углерод и тем ниже эффективность поглощения углерода. Это более реалистичная цель для устойчивого состояния, при котором все компоненты системы земледелия остаются неизменными.

Чтобы восстановить первоначальное содержание гумуса в черноземной почве, при маловероятном сценарии замены пахотных почв пастбищами, требуется 25–30 лет.

Однако значительное улучшение плодородия и структуры почвы может быть достигнуто через несколько лет путем регулярного внесения свежих органических веществ. Это кажется парадоксом. С одной стороны, секвестрация почвенного органического вещества требует накопления стабильного или защищенного ПОС, с другой – способность почвы обеспечивать питательные вещества для сельскохозяйственных культур зависит от скорости разложения подвижной фракции органического вещества почвы. В этом случае регулярное добавление растительных остатков и навоза на полях поддерживает запасы ПОС и общего азота путем подпитки почвенных микроорганизмов, которые разлагают подвижные фракции, высвобождая незамедлительно доступные питательные вещества, а также превращая их в микробную биомассу и стабильную фракцию ПОС, защищенную от минерализации за счет сочетания с глинистыми минералами (Cotrofo и др., 2013).

Чем больше разнообразие культур в севообороте, тем лучше качество ОВП; включение многолетних бобовых культур в севооборот обогащает почву как ПОС, так и азотом. С другой стороны, обработка почвы и ирригация сжигают гумус, поэтому обе эти технологии требуют дополнительного внесения навоза на полях для компенсации такого эффекта, тогда как применение минеральных удобрений фактически истощает ПОС и общий азот.

Таблица 4.1. Севооборот и органическое вещество почвы в *Sanborn Field*, штат Миссури, через 50 лет

Системы земледелия	Органическое вещество почвы (%)
<i>Бессменные культуры</i>	
Кукуруза на зерно	1.45
Озимая пшеница	3.40
Овес	4.08
Тимофеевка луговая	4.68
<i>Севообороты</i>	
Трехпольный севооборот: кукуруза – озимая пшеница – клевер	3.31
Четырехпольный севооборот: кукуруза – овес – озимая пшеница – клевер	3.74
Шестипольный севооборот: кукуруза – овес – пшеница – клевер – тимофеевка – тимофеевка	3.83
Естественный луг	5.78

4.2. Связывание углерода при различных методах ведения сельского хозяйства

4.2.1. Однолетние против многолетней растительности; no-till (без вспашки) против обычной обработки почвы

Резкие изменения происходят, когда вспахиваются целинные почвы и многолетняя растительность заменяется однолетней (*Crews and Rumsey, 2017; Lal, 2004*). Последующие потери ОВП зависят от методов ведения сельского хозяйства. Данные за пятьдесят лет из длительного опыта в *Sanborn Field* в Миссури, США (таблица 4.1) показывают наибольшие потери в бессменной кукурузе (75%, самые низкие – под тимopheевкой луговой (19%); и, как указывает *Albrecht (1979)*, потери при севооборотах столь же велики, как и при некоторых непрерывных однолетних культурах – бессменной культуре.

Компиляция и оценка долгосрочных канадских исследований о влиянии сельского хозяйства на запасы ПОС, проведенных *Vanden Bygaart* и др. (2003), показали, что Черная земля в прериях потеряла 24 ± 5 процентов своего естественного ПОС при ее распашке. Предполагая, что устойчивое состояние было достигнуто, они рассчитали, что переход от обычной технологии (в этой части мира она проводится не глубже 15 см) к нулевой обработке добавит $0,13\text{--}0,65$ тС/га/год в течение 8–12 лет, в зависимости от типа почвы (коричневый, темно-коричневый и черный чернозем) и в соответствии с годовым количеством осадков. Исключение черного пара в пользу бессменных посевов озимой пшеницы или севооборота, включающего многолетние бобовые культуры, способствовало дополнительному внесению $0,75\text{--}1,65$ т/га/год. Глубина отбора проб не была соблюдена в течение 20 долгосрочных полевых опытов в 7 местах, и рассматриваемый слой почвы находился в диапазоне от 0–15 до 0–45 см.

Впоследствии *Vanden Bygaart* и др. (2010) повторно отобрали почвенные образцы в 27 длительных полевых опытах на черноземе в *Alberta* и *Saskatchewan* (Канада), используя идентичные методы отбора проб и лабораторные процедуры, результаты были выражены в единицах эквивалентной массы почвы, которая учитывает изменения в объемной массе (*Ellert and Bettany, 1995*). Семь длительных полевых опытов, в которых сравнивались многолетнее возделывание культур (многолетняя пшеница, местные злаки и люцерна) с пшеницей, дали среднее увеличение запасов ПОС в слое 0–30 см на $9 \pm 1,5$ т С/га в течение $16,9 \pm 2,1$ года: ежегодный прирост $0,6$ т С/га/год. Замена чередующихся или сменяющихся один год через три года черного пара непрерывным возделыванием культур привела к изменению запаса на $5,2 \pm 1,1$ т С/га в течение $21,8 \pm 4$ года или $0,23$ т С/га/год. Определение выигрыша ПОС при нулевой обработке почвы было ограничено верхним 15-сантиметровым слоем; из семи экспериментальных площадок опыта только две показали значительный прирост, но в целом прирост ПОС от нулевых обработок составил $3,2 \pm 1,3$ т С/га в течение периода $23 \pm 2,7$ года, равный ежегодному приросту $0,14$ т С/га.

4.2.2. Севооборот и бессменные культуры

Более подробная картина раскрывается в длительном полевом опыте с севооборотами и бессменными культурами на типичном черноземе Бельцкой степи. В таблице 4.2 представлены данные по изменению запасов ПОС для слоя почвы 0–20 см, а в таблице 4.3 – для слоя 20–40 см. В 1962 году запас ПОС в слое 0–20 см составлял 78,7 т/га. Залежь была заложена позже, в 1984 году, и в это время все почвенные образцы были повторно отобраны.

В течение первых 22 лет (1962–1984 гг.) наибольшая потеря ПОС по сравнению с начальными запасами в почвенном слое 0–20 см наблюдалась под черным паром: 21,1 т/га на удобренных делянках, 19,7 т/га на удобренных делянках, потери составили 27% и 25% соответственно. Наименьшая потеря была связана с севооборотом, который включал многолетнюю бобовую культуру – люцерну 4,5 т/га или 6% от исходного запаса. Потери ПОС в бессменных посевах озимой пшеницы как на удобренных, так и на удобренных делянках были аналогичны потерям на удобренных делянках в севооборотах с 60% пропашных культур: 12,0–12,9 т/га. Потери в бессменных посевах кукурузы были аналогичны потерям в севообороте с 70 процентами пропашных культур: 14,4–15,8 т/га.

Образцы, отобранные в залежи в 1993 году (через 9 лет после закладки), показали потерю в 4,1 и 8,6 т С/га на удобренных и удобренных делянках соответственно, но накопление ПОС отмечено в течение следующих 29-ти лет (1984–2015). В случае типичного чернозема данные свидетельствуют о том, что для восстановления исходных запасов ПОС в 0–40 см слое почвы требуется 31 год на удобренной и 25–30 лет на удобренной залежи. На всех других участках запасы ПОС продолжали снижаться в период с 1984 по 2015 год, но разными темпами по сравнению с предыдущим периодом. По сравнению с исходным запасом, наибольшие потери ПОС во втором периоде произошли под черным паром: 27,6 т/га на удобренных делянках, 21,8 т/га на удобренных делянках – потери 35% и 28% соответственно. Наименьшие потери были под севооборотом с 60% пропашных культур и ежегодным внесением 12 т/га навоза: потеря 7,7 т/га, или 10 процентов от первоначального запаса. Потери ПОС на удобренной бессменной озимой пшенице и кукурузе, удобренных делянках в севообороте с 60% пропашных культур и удобренных делянках с 50% пропашных культур находились в диапазоне 19,4–22,8 т/га, или 25–29% исходного запаса. В севообороте с 40% пропашных культур и при бессменной кукурузе на удобренных делянках потери составили соответственно 14,4 и 16,3 т/га, или 18 и 21% исходных запасов. Наименьшие потери были на удобренных делянках бессменной озимой пшеницы и в севооборотах с 60% и 70% пропашных культур, получающих по 12 т/га навоза: 7,2 и 7,7 т/га, или 9% и 10% от первоначальных запасов соответственно. Несколько большие потери ПОС произошли в севооборотах с 60 и 70 процентами пропашных культур, с ежегодным внесением 8 т/га навоза: 7,7 и 10,8 т/га, или 10 и 14% от исходных запасов соответственно.

Сравнивая потери ПОС в течение первых 22 лет (1962–1984) с потерями в течение следующих 31 года (1984–2015), становится очевидным, что потери были больше в первые годы, а в случае залежи и удобренной бессменной озимой пшеницы первоначальные потери были восстановлены:

Таблица 4.2. Изменения в запасах органического углерода в слое почвы 0–20 см (т/га) с 1962 года в длительном полевом опыте по севооборотам и бесменным посевам на типичном черноземе Бельцкой степи. Исходный запас углерода в 1962 году составил 78,7 т/га

Показатели	Залежь		Черный пар*		Бесменные посевы			Севообороты						
					Озимая пшеница		Кукуруза на зерно		Доля пропашных культур (%)					
	Не-удобр. брен.	Удобр. NPK + навоз	Не-удобр. брен.	Удобр. NPK + навоз					Неудобр.	Удобр.	40	50	60	60
1984														
Запас С (т/га)	70.1	74.6	57.6	59.0	65.8	66.2	62.9	64.3	74.2	67.9	-	66.7	66.5	64.1
Потеря углерода (т/га)	-8.6	-4.1	-21.1	-19.7	-12.9	-12.5	-15.8	-14.4	-4.5	-10.8	-	-12.0	-12.2	-14.6
Потеря углерода (%)	11.0	5.0	27.0	25.0	16.0	16.0	20.0	18.0	6.0	14.0	-	15.0	16.0	19.0
Годовая потеря (т/га)	0.39	0.19	0.96	0.89	0.59	0.57	0.72	0.65	0.20	0.49	-	0.54	0.55	0.66
2009														
Запас С (т/га)	76.6	76.6	55.2	55.9	60.0	73.4	60.5	67.4	64.8	59.5	60.7	62.2	63.8	63.1
Потеря углерода (т/га)	2.1	2.1	23.5	22.8	18.7	5.3	18.2	11.3	13.9	19.2	18.0	16.5	14.9	-15.6
Годовое изменение С (т/га)	-0.04	-0.04	-0.5	-0.48	-0.40	+0.11	-0.39	-0.24	-0.30	-0.41	-0.38	0.35	0.32	0.33

Показатели	Залежь		Черный пар*		Бесменные посевы				Севобороты								
					Озимая пшеница		Кукуруза на зерно		Доля пропашных культур (%)								
	Не-удобр. брен.	Удобр. NPK + навоз	Не-удобр. брен.	Удобр. NPK + навоз	Не-удобр.	Удобр.	40	NPK + 4 т/га навоза	50	60	Неу-добр.	NPK+ 8 т/га навоза	60	NPK+ 12 т/га навоза	70	NPK+ 8 т/га навоза	
2015																	
Запас С (т/га)	79.4	80.2	51.1	56.9	59.3	71.5	55.9	62.4	64.3	57.4	59.3	65.3	71.0	67.9			
Изменение запаса С (т/га)	+0.7	+1.5	-27.6	-21.8	-19.4	-7.2	-22.8	-16.3	-14.4	-21.3	-19.4	-13.4	-7.7	-10.8			
Изменение запаса (%)	+0.19	+1.9	-35.0	-27.7	-24.7	-9.2	-29.0	-20.7	-18.3	-27.1	-24.7	-17.0	-9.8	13.7			
Годовое изменение запаса С (т/га)	+0.04	+0.03	-0.52	-0.41	-0.37	-0.14	-0.43	-0.31	-0.27	-0.40	-0.37	-0.25	-0.15	0.20			
Потери в 2015 г. относительно 1984 г.																	
Годовое изменение С (т/га)	+9.3	+5.6	-6.5	-2.1	-6.5	+5.3	-7.0	-1.9	-9.9	-10.5	-	-1.4	+4.5	+3.8			
Изменение запаса С (%)	+11.8	+7.1	-8.3	-2.7	-8.3	+6.7	-8.9	-2.4	-12.6	-13.3	-	-1.8	+5.7	+4.8			

* Делянки под черным паром, заложенные в 1965 году.

Таблица 4.3. Изменения в запасах органического углерода почвы на глубине 20–40 см (т/га) с 1962 г. в длительных полевых опытах по севооборотам и бесменным посевам на типичном черноземе Бельской степи. Исходный запас углерода в 1962 году составил 78,7 т/га

Показатели	Залежь		Черный пар*		Бесменные посевы				Севообороты					
					Озимая пшеница		Кукуруза на зерно		Доля пропашных культур (%)					
	Не-удобр. брен.	Удобр. NPK + навоз	Не-удобр. брен.	Удобр. NPK + навоз	Не-удобр.	Удобр.	40	50	60	60	60	70		
1984														
Запас С (т/га)	74.4 ^а	80.1 ^а	60.8	62.7	69.7	68.4	65.8	67.9	75.7	71.2	-	71.2	70.7	68.4
Изменение запаса С (т/га)	-2.3	+3.4	-15.9	-14.0	-7.0	-8.3	-10.9	-8.8	-1.0	-5.5	-	-5.5	-6.0	-8.3
Изменение запаса С (%)	-3	+4.4	-21	-18	-9	-11	-14	-12	-1	-7	-	-7	-8	11
Изменение годового запаса (т/га)	-0.10	+0.15	0.72	0.64	0.32	0.38	0.50	0.40	0.04	0.25	-	0.25	0.27	0.38
2009														
Запас С (т/га)	74.9	80.1	58.0	58.8	64.2	76.2	64.2	68.1	67.9	62.1	59.8	65.5	65.5	66.3
Изменение запаса С (т/га)	-1.8	+3.4	-18.7	-17.9	-12.5	-0.2	-12.5	-8.6	-8.8	-14.6	-16.9	-11.2	-11.2	-11.4
Изменение годового запаса С (т/га)	-0.04	+0.07	-0.04	-0.38	-0.27	-0.01	-0.27	-0.18	-0.19	-0.32	-0.36	-0.24	-0.24	0.22

Показатели	Залежь		Черный пар*		Бессменные посевы			Свооборог					
					Озимая пшеница		Кукуруза на зерно	Доля пропашных культур (%)					
	Не-удобр. брен.	Удобр. NPK + навоз	Не-удобр. брен.	Удобр. NPK + навоз	Не-удобр.	Удобр.	Удобр.	40	50	60	60	60	70
2015													
Запас C (т/га)	78.3	80.9	53.6	59.8	63.4	77.2	59.5	67.9	61.1	62.4	68.1	74.4	68.1
Изменение запаса C (т/га)	+1.6	+4.2	-23.1	-16.9	-13.3	+0.5	-17.2	-8.8	-15.6	14.3	-8.6	-2.3	-8.6
Изменение запаса C, (%)	+2.1	+5.5	-30.1	-22.0	-17.3	+0.65	-22.4	-11.5	-20.3	-	-11.2	-3.0	-11.2
Изменение годового запаса (т/га)	+0.03	+0.08	-0.44	-0.32	-0.25	-0.01	-0.32	-0.17	-0.29	-0.27	-0.16	-0.04	-0.16
Потери в 2015 относительно 1984													
Годовое изменение C (т/га)	+3.9	+0.8	-7.2	-2.9	-6.3	+8.8	-6.3	0	-10.1	-	-3.1	+3.7	-0.3
Изменение запаса C (%)	+5.1	+1.0	-9.4	-3.8	-8.2	+11.5	-8.2	0	-13.2	-	-4.1	+4.8	-0.4

* Делянки под черным паром, заложенные в 1965 г.
а 1993 г.

- для черного пара, удобренного и неудобренного: потери составили 27–25% и 8–3% соответственно;
- для бессменной кукурузы, удобренной и неудобренной: потери 20–18% и 9–2% соответственно;
- для бессменной озимой пшеницы, удобренной и неудобренной: 16–8% снижаются до 9% на неудобренных участках и на 7% на удобренных участках;
- для удобренных участков в севооборотах с 60% и 70% пропашных культур: потери 15–19% и 2–6% соответственно;
- для залежи первоначальные потери были сменены на выигрыш в 12% и 7% соответственно.

Однако в некоторых случаях потери оставались такими же или увеличивались: в севообороте с 50 процентами пропашных культур потери составляли 14 процентов в первый период и 13 процентов во второй; в севообороте с 30 процентами люцерны потери увеличились с 6 до 13 процентов. Возникает вопрос: почему наибольшие потери ПОС определены в этих двух севооборотах – один с люцерной и самой низкой долей пропашных культур (40%), но с недостаточным внесением навоза (4 т/га севооборота), а другой, с 10 процентами черного пара, 50 процентами пропашных культур и отсутствием навоза с 1976 года? И остаются ли эти потери на том же уровне в более глубоких слоях почвы, что и в слое почвы 0–20 см?

Годовое количество углерода биомассы, включенного в почву в качестве растительных остатков и навоза в течение первых 30 лет эксперимента, показано в таблице 4.4. Простое сравнение внесения органического углерода и изменений в ПОС не показывает очевидной связи. Например, наибольший вклад органического углерода (в удобренную бессменную кукурузу на зерно) не привел к самым высоким запасам ПОС: самый низкий вклад органического углерода (в бессменную озимую пшеницу) не привел к наименьшему ПОС. Вероятно, помимо количества внесенного углерода, важно знать их качество и экологические условия их разложения.

Изменения в запасах ПОС в слое почвы 20–40 см (таблица 4.3) показывают ту же картину, что и в слое 0–20 см, с большими потерями в первом периоде, чем в следующем периоде:

- Наилучшие условия для накопления ПОС были в залежи, где первоначальные потери были значительно ниже в слое почвы 20–40 см, чем в слое почвы 0–20 см.
- Для черного пара, удобренного и неудобренного: потеря 21–18% и 9–4% соответственно.
- Для бессменной кукурузы, удобренной и неудобренной: потеря составила 14–12% и 8% соответственно.
- Для бессменной озимой пшеницы, удобренной и неудобренной: потеря 9–11% и от –8 до +12% соответственно.
- Для севооборотов с удобрениями с 60- и 70-процентными пропашными культурами и внесением 12 и 8 т/га навоза соответственно, потери составили 8–11% и от –0,4 до + 5%.
- Что касается севооборота с 50 процентами пропашных культур и 10 процентами черного пара без навоза с 1976 года потери ПОС в слое почвы

20–40 см удвоились с 5,5 т/га (7%) в первый период до 10,1 т/га (13%) во втором периоде. Потеря ПОС также увеличилась в севообороте с 40 процентами пропашных культур и 30 процентами люцерны, но в меньшей степени, чем в слое почвы 0–20 см: потери увеличились с 1 т/га (1%) в первый период до 6,8 т/га (9%) во втором периоде по сравнению с потерями в слое 0–20 см в 4,5 т/га (6%) и 9,9 т/га (13%) соответственно. Эти два севооборота представляют крайности в отношении органического углерода, но мы должны сделать вывод, что оба ухудшают почву. В севообороте с 40 процентами пропашных культур люцерна обогащает почву растительными остатками с низким соотношением C:N (таблица 4.5), но поскольку существует дефицит ПОС, азот все еще может быть потерян. Противоположная картина наблюдается в севообороте с черным паром, где недостаток свежих растительных остатков и навоза приводит к большему разложению ОВП.

- Единственным севооборотом, который мог значительно сократить потери ПОС, был севооборот с 60 процентами пропашных культур при ежегодном внесении 12 т/га навоза, но даже это не поддержало исходные запасы углерода.

Таблица 4.4. Ежегодные поступления органического углерода (т/га) с растительными остатками и навозом крупного рогатого скота в длительном полевом опыте с севооборотами и бессменными посевами, НИИПК *Selectia*, 1962–1991 гг.

Севообороты	Пропашные культуры, %				Бессменные посевы*			
	40	50	60	70	Озимая пшеница		Кукуруза на зерно	
					Удобр.	Неудобр.	Удобр.	Неудобр.
1 ^а (1962–1971 гг.)	19.9	19.4	22.3	22.2	16.6	8.4	22.3	13.1
2 ^а (1972–1981 гг.)	27.9	18.0	32.7	28.8	27.8	10.7	38.1	17.7
3 ^а (1982–1991 гг.)	27.1	20.0	34.4	29.8	31.6	9.3	38.2	13.5
Среднее	25.0	19.1	30.0	26.3	25.3	9.5	32.9	14.8

* Начиная с 1965 г.

Таблица 4.5. Изменения в содержании органического углерода в почве в севооборотах с люцерной и без нее в длительных полевых опытах на типичном черноземе в Бельцах, 1992–2015 гг. (среднее из трех повторностей), %

Слои почвы (см)	Севооборот с люцерной				Севооборот без люцерны			
	1992	2015	±	%	1992	2015	±	%
0-20	3.24	2.68	-0.56	-17.3	3.03	2.39	-0.64	-21.1
20-40	2.90	2.65	-0.25	-8.6	2.62	2.35	-0.27	-10.3
40-60	2.16	2.37	+0.21	+9.7	1.98	2.02	+0.04	+2.0
60-80	1.33	1.89	+0.56	+42.1	1.11	1.36	+0.25	+22.5
80-100	-	1.54	-	-	0.69	0.99	+0.30	+43.8

Данные, представленные в таблице 4.6, подчеркивают важность многолетних трав для поддержания углеродного статуса по всему профилю почвы. Наибольшая концентрация ПОС была установлена в залежи, наименьшая – в черном пару. Содержание ПОС в севообороте с 40% пропашных культур и 30% люцерны были аналогичны содержанию в севообороте с 60% пропашных культур и ежегодным внесением 12 т/га навоза крупного рогатого скота; оба имеют более высокий ПОС, особенно в слоях почвы 60–100 см по сравнению с другими севооборотами и особенно – по сравнению с черным паром. То же самое относится и к общему азоту (таблица 4.7). Соотношение C:N более или менее стабильно для разных слоев почвы, даже для вариантов с разным количеством и качеством растительных остатков, хотя мы могли ожидать, что эффективность связывания углерода зависит от количества и качества растительных остатков и, особенно, от корневой системы.

4.2.3. Верхний слой почвы против подпочвы; корни против надземной части

Черноземы характеризуются чрезвычайно толстыми гумусовыми горизонтами, средней и тяжелой текстурой и устойчивыми почвенными агрегатами. Все приведенные выше данные указывают на значительные различия между поведением гумуса в верхнем и нижнем слоях почвы, которые могут быть использованы для увеличения ПОС в подпочве. На глобальном уровне Джексон и другие (*Jackson and others*, 1996) оценили биомассу тонких корней, длину и площадь поверхности, а также распределение корней в почвенном профиле. Сравнивая умеренные пастбища с умеренно-лиственными лесами, они обнаружили, что общая биомасса мелких корней в 24 раза больше, биомасса живых мелких корней в 27 раз больше, длина тонких корней в 26,6 раза больше; и поверхность тонких корней в 10,3 раза больше. Мелкие корни составляют одну треть чистой первичной продуктивности, но вносят в ПОС более чем в два раза больше, чем надземные части сельскохозяйственных культур.

Проведенный недавно метаанализ естественного содержания ^{13}C в пахотных почвах показывает, что продолжительность нахождения ПОС в четыре раза больше в подпочвенном слое (30–100 см), чем в верхнем слое почвы – 0–30 см (*Balesdent и др.*, 2017). Согласно *Rasse и др.* (2005), среднее время нахождения корневого углерода больше, чем у надземных частей: отношение лигнина к N для корней в 3 раза больше, чем для надземной части, и более медленное разложение тканей корней также может быть объяснено защитой внутри устойчивых почвенных агрегатов и тесной связью в глинисто-органическом комплексе. Вклад корней в ПОС больше в более глубоких слоях почвы (*Follett*, 2001); в то же время, более низкая скорость минерализации ПОС в более глубоком слое почвы объясняется меньшим поступлением свежего органического углерода и низкими скоростями разложения (*Fontaine и др.*, 2007).

Поступление углерода из растительных остатков оценивается путем промывки и взвешивания корней в период цветения, но эта трудоемкая процедура не учитывает вклада корневых экссудатов или регенерацию корней. *Sauerbeck* и другие (1976), использующие ^{14}C , обнаружили на 20–60 процентов больше корней, чем

Таблица 4.6. Содержание углерода в залежи, в черном пару, под бессменными культурами и в севооборотах в длительном полевом опыте на типичном черноземе в Бельцах, 2015 г. (среднее из 3-х повторностей для севооборотов), %

Показатели	Залежь		Черный пар	Бессменные посеы			Севообороты					
							Доля пропашных культур (%)					
	Не-удобр.	Удобр.	Не-удобр.	Удобр.	Озимая пшеница	Кукуруза на зерно	40	50	60	60	60	70
0-20	3.31	3.34	Не-удобр.	Удобр.	Не-удобр.	Удобр.	НРК + 4 т/га навоза	НРК	Не-удобр.	НРК + 8 т/га навоза	НРК + 12 т/га навоза	НРК + 8 т/га навоза
20-40	3.01	3.11	2.13	2.37	2.47	2.98	2.33	2.60	2.47	2.72	2.96	2.83
40-60	2.85	2.97	1.85	2.03	2.12	2.71	2.21	2.27	1.98	2.29	2.58	2.51
60-80	2.26	2.54	1.30	1.45	1.53	1.88	1.48	1.84	1.47	1.54	2.01	1.75
80-100	1.64	1.96	0.87	1.34	1.41	1.42	1.24	1.22	1.08	1.18	1.10	1.20

Таблица 4.7. Содержание С, N и C:N в разных севооборотах в длительных полевых опытах на типичном черноземе в Бельцах, 2015 г. (среднее из 3-х повторностей)

Почвенный слой (см)	Севооборот					
	С люцерной			Без люцерны		
	С (%)	N (%)	C:N	С (%)	N (%)	C:N
0-20	2.68	0.284	9.4	2.39	0.218	11.0
20-40	2.65	0.264	10.0	2.35	0.210	11.2
40-60	2.37	0.234	10.1	2.02	0.197	10.2
60-80	1.89	0.193	9.8	1.36	0.139	9.8
80-100	1.54	0.146	10.5	1.00	0.110	9.1

Таблица 4.8. Коэффициенты для определения массы корней при уборке различных культур в зависимости от урожая основной продукции

Культуры	коэффициент
Озимая пшеница	1.1
Яровой ячмень	0.9
Горох	1.07
Кукуруза на зерно	1.1
Кукуруза на силос	0.16
Подсолнечник	1.8
Сахарная свекла	0.075
Картофель и другие овощи	0.8
Вика-овес на сено	0.8
Многолетние бобовые на сено	0.85-0.90

количество, полученное при промывке. *Kuzyakov and Domanski* (2000) подсчитали, что 50 процентов находящегося в подземной части углерода находится в корнях, 30 процентов – в корневых экссудатах и выделенного из корней CO_2 , остальные 20 процентов – в почвенных микроорганизмах и ОВП. Коэффициенты, представленные в таблице 4.8, получены на основе наших собственных данных после мытья корней и данных из литературных источников. Например, если урожайность озимой пшеницы составляет 4,0 т/га, количество корней будет 4,4 т/га, но мы должны увеличить это значение на 50 процентов, чтобы учесть корневые экссудаты и регенерацию в течение вегетационного периода, поэтому масса органического вещества, добавленного в почву, составит 6,6 т/га.

С помощью лабораторного анализа мы определили содержание углерода и азота в различных растительных остатках и в органических удобрениях (таблица 4.9).

Таблица 4.9. Содержание С, N и лигнина в сухом веществе и соотношение С:N и лигнин:N в органических остатках, %

Органические остатки		С	N	лигнин	С:N	лигнин:N
Вика яровая	корни	40.9	1.87	10.2	21.9	5.4
	стебли + листья	42.6	3.76	14.0	11.3	3.7
Люцерна	корни	41.4	2.22	13.3	18.7	6.0
	стебли + листья	41.8	2.74	18.2	15.3	6.6
Донник	корни	32.7	1.74	12.4	27.0	8.4
	стебли	41.7	2.35	17.2	17.8	7.3
Сахарная свекла	корни	40.8	1.48	6.60	27.7	5.6
	листья	32.8	1.84	10.4	17.8	4.4
Картофель	стебли	42.4	1.77	19.7	24.0	11.1
	корни	38.9	1.53	22.5	25.0	14.7
Подсолнечник	корни	43.5	0.65	32.1	67.0	49.4
	стебли + листья	41.8	1.23	26.8	34.0	21.3
Многолетний райграс	корни	37.7	0.85	11.4	44.3	13.4
	стебли + листья	40.9	2.00	10.9	20.5	5.4
Кукуруза	корни	43.4	0.62	24.0	70.0	38.6
	побеги	41.3	0.70	28.3	59.0	41.8
Свежий навоз		43.3	0.73	22.1	59.3	30.3
Компостированный навоз		13.2	0.51	16.0	25.9	31.4
Пшеничная солома		40.1	0.48	19.5	81.8	33.8

Содержание углерода одинаково для большинства сельскохозяйственных культур, за исключением надземной части сахарной свеклы (33 процента), свежего навоза и компоста (43–50 и 3–20 процентов соответственно). Наибольшее содержание азота содержится в остатках бобовых: 2,4–3,8% для надземных частей и 1,5–2,2% для корней. Меньшее содержание азота характерно для остатков кукурузы на зерно и озимой пшеницы (0,49–0,62 процента), корней подсолнечника (0,65 процента), многолетнего райграса (0,85 процента), свежего навоза (0,73 процента) и компоста (0,51 процента). Соотношение С:N является более узким для бобовых, сахарной свеклы и картофеля; и шире для всех других культур, кроме надземных частей райграса и для компоста. Соотношение лигнин : азот меняется аналогично.

Зная соотношение С:N в надземных и подземных частях сельскохозяйственных культур, мы можем определить поступление азота в почву из разных источ-

Таблица 4.10. Эффективность использования азота из мобильной фракции ОВП в длительном полевом опыте в НИИПК *Selectia*, 1993 г.

Севооборот	Запасы мобильной фракции ОВП (т/га) ^a		Зеленая масса озимой ржи (т/га)	Количество N, поглощенного озимой рожью (кг/га)	N минерализованный из ОВП (кг/га) ^b	Доля N, минерализованного из мобильной фракции ОВП (%) ^c
	C	N				
40%	19.5	0.50	5.4	49	38	19.6
50%	16.4	0.86	3.8	32	64	7.4
60%	26.8	0.79	6.2	57	114	14.4
70%	15.5	1.02	4.3	35	70	6.9

^a Запасы мобильной фракции ОВП, определенные по методу *Cambardella*.

^b Эффективность использования растениями N из ОВП = 50%, т. е. количество минерализованного N из ОВП в два раза больше, чем количество, потребляемое рожью.

^c Доля годового минерализованного N из ОВП для покрытия потребности растений в N (в соответствии с количеством, потребляемым культурой) из общего запаса N в мобильной фракции ОВП.

ников. Согласно нашим данным и данным литературных источников (*Cassman and Harwood*, 1995; *Magdoff and van Es*, 2010), около 70 процентов поступающего азота минерализуется в течение первого года. Этот азот из органических остатков вместе с минерализацией ОВП составляет фракцию азота в мобильной части, доступной для сельскохозяйственных культур. Данные, представленные в таблице 4.10 за 1993 год, можно было получить, посеяв одну культуру (озимая рожь на зеленую массу) по всей площади длительного полевого опыта с севооборотами, чтобы оценить реальный уровень плодородия почвы на разных делянках без внесения удобрений.

Разложение азота и углерода может варьировать даже при одинаковых запасах углерода или азота в мобильной фракции ОВП. Запасы азота в мобильной фракции ОВП в двух севооборотах с 50 и 60 процентами пропашных культур одинаковые (0,86 и 0,79 т/га соответственно), но имеют довольно разные скорости минерализации азота. В севообороте с 50 процентами пропашных культур доля азота, минерализованного из мобильной фракции ОВП, составляет 14 процентов для удобренных делянок и 7 процентов – для удобренных. При этом в севообороте с 40 процентами пропашных культур и 30 процентами люцерны и с наименьшим запасом мобильного азота доля минерализованного азота из мобильной фракции ОВП является самой высокой – 20 процентов. Таким образом, не только количество и качество растительных остатков влияют на их разложение и способность выделять азот для сельскохозяйственных культур, но также и качество самого органического вещества почвы.

Потенциальная способность почвы снабжать культуры азотом может быть определена на удобренных полосах для разных культур на разных полях. Эта информация может помочь уменьшить применение азота из минеральных

Таблица 4.11. Коэффициенты минерализации ОВП в длительных полевых опытах с севооборотами и бессменными культурами на типичном черноземе в Бельцах, слой почвы 0–20 см

Варианты	Запас ПОС, т С/га	Ежегодные поступления		Годовой дефицит ПОС, т С/га	Годовая минерали- зация ПОС (%)***	Годовая доля свежего органи- ческого вещества в общих минера- лизационных поте- рях органического вещества почвы
		т С/га*	Мине- рали- зация в 1 ^{ый} год**			
Бессменные культуры и бессменный черный пар						
Черный пар, неудобренный;	60.8	-	-	0.82	1.4	-
Черный пар, удобренный;	60.8	1.7	0.85	0.68	2.5	55
Бессменная кукуруза, удобренная;	65.4	1.35	0.94	0.50	2.2	65
Бессменная кукуруза, неудобренная	67.5	4.0	2.50	0.42	4.3	86
Севообороты с разной насыщенностью пропашными культурами (%)						
40%	69.4	3.1	2.0	0.26	3.3	89
50%	68.9	2.2	1.5	0.31	2.6	83
60%	71.5	3.9	2.4	0.29	3.8	89

* Без учета корневых выделений и регенерации корней в период вегетации.

** Ежегодная минерализация растительных остатков (70%) и навоза (50%).

*** Общие ежегодные минерализационные потери поступившего с растительными остатками и навозом С.

удобрений, потому что азот от разложения ОВП, навоза и бобовых культур составляет 75–80% азота, фактически потребляемого культурами. После хороших предшественников или на высокоплодородных почвах минеральные удобрения неэффективны (см. главу 5). Такие данные могут также показать ежегодные потери углерода в результате минерализации и относительную способность гумификации углерода в почве. Более низкие или более высокие значения секвестрации углерода мало говорят нам об агрономической и экологической роли ОВП или качестве почвы; однако невозможно переоценить большую долю свежих растительных остатков культур в общей минерализации ОВП, особенно в севооборотах (таблица 4.11). Земледелие является неустойчивым без регулярного поступления свежего органического углерода для обеспечения энергией биоты почвы.

Фермеры могут предположить, что с добавлением удобрений количество корней увеличивается пропорционально надземной биомассе. Это не так. Лыков А. М. (1977), обобщая данные из литературы, пришел к выводу, что минеральные удобрения увеличивают массу корней, но не пропорционально увеличению урожайности. Kuzyakov и Domanski (2000) обнаружили, что N из минеральных удобрений фактически уменьшает массу корней, поэтому большее количество азотных удобрений может означать меньшую долю гумифицированного углерода. Данные исследователи считают, что зерновые культуры и многолетние травы накапливают одинаковое количество углерода в подземной части в течение того же периода роста, но из-за более продолжительного вегетационного периода многолетние травы накапливают дополнительно 600 кг/га/год под землей, поэтому вклад однолетних зерновых культур и многолетних трав составляет 1500 и 2200 кг/га/год, соответственно.

Индустриальные вложения (инпуты) сопряжены со скрытыми расходами углерода. Lee и Dodson (1996), на которых ссылаются Conant и др. (2001), определили поглощение 0,16 т С/га/год пастбищами, получившими 70 кг N/га; но на каждый килограмм азота, произведенного в промышленных масштабах, в атмосферу выбрасывается 1,4 кг С, поэтому закрепление чистого С будет составлять всего лишь 0,06 т С/га/год. Производство пестицидов для «борьбы» с сорняками по меньшей мере в 5 раз более углеродоемкое, чем производство удобрений. Различные методы менеджмента также способствуют выбросам окиси азота; Freibauer и др. (2004) считают, что выброс N_2O при *no-till* (без вспашки) в результате денитрификации может перевесить положительное влияние связывания углерода на общий потенциал снижения выбросов парниковых газов.

4.2.3. Удобрение

По результатам одного из длительных полевых опытов в Бельцах можно сопоставить урожайность и состояние почвы на неудобренном контроле, а также при увеличении нормы минеральных удобрений – NPK 75 (1), NPK 130 (2) и NPK 175 (3) кг активного действующего вещества и 15 т навоза на гектар севооборота, внесенного отдельно и вместе с тремя дозами минеральных удобрений. В таблице 4.12 показано изменение запасов и потерь ОВП для разных слоев почвы с начала эксперимента в 1970 году.

По сравнению с контролем, минеральные удобрения удвоили ежегодные потери ОВП в самом верхнем слое почвы. Ежегодные потери ОВП составляют 600 кг/га на неудобренном контроле и 1241–1274 кг/га на делянках, получающих NPK₂ и NPK₃; несколько меньше на делянках, получающих более низкую дозу удобрения – NPK₁. Только применение навоза, отдельно или вместе с NPK, привело к накоплению ОВП, хотя их действие отличается. Наибольшее положительное влияние на накопление ОВП оказало применение 15 т/га навоза + NPK₁ и + NPK₃ – 256,4 и 438,5 кг/га соответственно.

На неудобренных делянках и на делянках с разными дозами минеральных удобрений потери составили 28–34% от всей потери ОВП из самых верхних слоев почв – 40 см; прирост ОВП был достигнут в слое 40–100 см. Очевидно, что для любой оценки секвестрации углерода мы должны рассмотреть эти более глубокие слои

Таблица 4.12. Изменение запасов органического вещества почвы (по углероду) в типичном черноземе в севообороте при разных системах удобрения, 1970–2009 гг., т/га

Слой почвы (см)	Исходный запас т C/га	Неудобрен.		NPK ₁		NPK ₂		NPK ₃		Навоз + NPK ₁		Навоз + NPK ₂		Навоз + NPK ₃		Навоз	
		т C/га	±	т C/га	±	т C/га	±	т C/га	±	т C/га	±	т C/га	±	т C/га	±	т C/га	±
0-20	59.8	50.6	-9.2	55.2	-4.6	48.6	-1.2	48.4	-11.4	51.3	-8.5	53.0	-6.8	53.9	-5.9	51.7	-8.1
20-40	53.0	55.2	+2.2	45.6	-7.4	47.5	-5.5	48.0	-5.0	54.7	+1.7	52.8	-0.2	57.1	+4.1	52.8	-0.2
40-60	41.5	31.7	-9.8	29.9	-11.6	24.7	-16.8	27.8	-13.7	52.5	+11.0	39.5	-2.0	46.5	+5.0	42.9	+1.4
60-80	25.2	22.4	-2.8	15.9	-9.3	15.9	-9.3	14.3	-10.9	25.7	+0.5	30.9	+5.7	36.9	+11.7	33.8	+8.6
80-100	20.4	16.6	-3.8	10.9	-9.5	13.5	-6.9	13.0	-7.4	25.7	5.3	24.2	3.8	22.6	2.2	20.5	+0.1
Всего	199.9	176.5	-23.4	157.5	-42.4	150.2	-49.7	151.5	-48.4	209.9	+100	200.4	+0.5	217.0	+17.1	201.7	+1.8
потеря C из общих потерь по слоям почвы																	
0-40	т C/га	-7.0		-12.0		-16.7		-16.4		-6.8		-7.0		-1.8		-8.3	
	%	29.9		28.3		33.6		33.9									
40-100	т C/га	-16.4		-30.4		-33.0		-32.0		+16.8		+7.5		+18.9		+10.1	
	%	70.1		71.7		66.4		66.1									
Ежегодное изменение запасов органического вещества почвы, 0-100 см, кг C/га		-600.0		-1087.2		-1274.4		-1241.0		+256.4		+12.8		+438.5		+46.1	

Таблица 4.13. Изменение запасов общего углерода в типичном черноземе в севообороте при разных системах удобрения относительно контроля, 2009 г.

Слои почвы (см)	Неудобрен. контроль		NPK ₁		NPK ₂		NPK ₃		Навоз + NPK ₁		Навоз + NPK ₂		Навоз + NPK ₃		Навоз	
	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%
0-20	50.6	100	+4.6	9.1	-2.0	3.9	-2.2	4.3	+0.7	1.4	+2.4	4.2	+3.3	6.5	+1.1	2.2
20-40	55.2	100	-9.6	17.4	-7.2	13.9	-7.2	13.0	-0.5	0.9	-2.4	4.3	+1.9	3.4	-2.4	4.3
40-60	31.7	100	-1.8	5.7	-7.0	22.1	-3.9	12.3	+20.8	65.6	+7.8	24.6	+14.8	46.7	+11.2	35.3
60-80	22.4	100	-6.5	29.1	-6.5	29.0	-8.1	36.2	+3.3	14.7	+8.5	38	+14.5	64.7	+11.4	50.9
80-100	16.6	100	-5.7	34.3	-3.1	18.7	-3.6	21.7	+9.1	54.8	+7.6	45.8	+6.0	36.1	+3.9	23.5
0-100	176.5	100	-19.0	10.8	-26.3	14.9	-25	14.2	+33.4	18.9	+23.9	13.5	+40.5	23.0	+25.2	14.3
потери С из общих потерь углерода по слоям почвы																
0-40			-5.0	26.3	-9.7	36.9	-9.4	37.6	+0.2	0.6	0	0	+12.8	31.6	-1.3	0
40-100			-14.0	73.7	-16.6	63.1	-15.6	62.4	+33.2	99.4	+23.9	100	+27.7	68.4	+23.9	100

Таблица 4.14. Изменение запасов общего азота в типичном черноземе в севообороте при разных системах удобрения, 1970-2009 гг.

Слой почвы (см)	Общий запас N, т/га	Без удобрений		NPK ₁		NPK ₂		NPK ₃		Навоз +NPK ₁		Навоз +NPK ₂		Навоз +NPK ₃		Навоз	
		т/га	±	т/га	±	т/га	±	т/га	±	т/га	±	т/га	±	т/га	±	т/га	±
0-20 см	5.64	3.82	-1.82	3.94	-1.70	4.07	-1.57	3.70	-1.94	4.93	-0.71	4.18	-1.46	4.69	-0.95	5.04	-0.60
20-40 см	5.43	4.56	-0.87	3.62	-1.81	3.77	-1.66	3.89	-1.54	4.85	-0.58	4.18	-1.25	4.70	-0.73	4.70	-0.73
40-60 см	4.19	2.47	-1.72	3.04	-1.15	2.76	-1.43	3.04	-1.15	4.50	+0.31	3.48	-0.71	3.93	-0.26	3.80	-0.39
60-80 см	3.44	1.90	-1.54	1.90	-1.54	2.03	-1.41	1.90	-1.54	2.76	-0.68	2.91	-0.53	3.48	+0.04	2.91	-0.53
80-100 см	2.90	1.46	-1.44	1.61	-1.29	1.61	-1.28	1.46	-1.44	2.31	-0.59	2.63	-0.27	2.47	-0.43	2.18	-0.72
Всего	21.6	14.21	-7.39	14.11	-7.49	14.24	-7.36	13.99	-7.61	19.35	-2.25	17.38	-4.22	19.27	-2.33	18.63	-2.97
потеря N из общих потерь по слоям почвы																	
0-40 см	т/га	-2.69		-3.51		-3.23		-3.48		-1.29		-2.71		-1.68		-1.33	
	%	36		47		44		46		57		64		72		45	
40-100 см	т/га	-4.7		-3.98		-4.13		-4.13		-0.96		-1.51		-0.65		-1.64	
	%	64		53		56		54		43		35		28		55	
Ежегодные потери общего N, 0-100 см, кг N/га		-600.0		-189.5		-192.0		-188.7		-195.1		-57.7		-108.2		-59.7	

Таблица 4.15. Изменение общих запасов азота в типичном черноземе в севообороте при разных системах удобрения, 2009 г.

Слои почвы (см)	Неудобрен. контроль		НРК ₁		НРК ₂		НРК ₃		Навоз +НРК ₁		Навоз +НРК ₂		Навоз + НРК ₃		Навоз	
	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%
0-20	3.82	100	+0.12	3	+0.25	7	-0.12	3	+1.11	3	+0.36	9	+0.87	23	+1.22	32
20-40	4.56	100	-0.94	21	-0.79	17	-0.62	15	+0.29	6	-0.38	8	+0.14	3	+0.14	3
40-60	2.47	100	+0.57	23	+0.29	12	+0.57	23	+2.03	82	+1.01	41	+1.46	59	+1.33	54
60-80	1.90	100	0	0	+0.13	7	0	0	+0.86	45	+1.01	53	1.58	83	+1.01	53
80-100	1.46	100	+0.15	10	+0.15	10	0	0	+0.85	58	+1.17	80	+1.01	69	+0.72	49
0-100	14.2	100	-0.1	1	+0.03		-0.22	2	+5.14	36	+3.17	22	+5.06	36	+4.42	31
Изменение запаса по слоям почвы																
0-40	-	-	-0.82	-	-0.54	-	-0.79	-	+1.4	27	-0.02	-	+1.01	20	+1.36	31
40-100	-	-	+0.72	-	+0.57	-	+0.57	-	+3.74	73	+3.19	100	+4.05	80	+3.06	69

почвы. Таблица 4.13 показывает изменения в запасах ОВП с этой точки зрения. Из общих потерь в 19,0–26,3 т/га из одного метра почвенного профиля под воздействием минеральных удобрений 26–38 процентов составили потери из верхних 40 см, а остальные из слоя 40–100 см. Прибавка ОВП за счет навоза и сочетания навоза с минеральными удобрениями составила 25,2–40,5 т/га в основном в слое 40–100 см.

Полевой опыт в университете *Sanborn* в Миссури (Колумбия, США) является хорошим доказательством ценности растительных остатков для восстановления плодородия почвы. Удаление растительных остатков с урожаях вплоть до 1949 года сдерживало последующее восстановление ОВП, которое продолжало уменьшаться при непрерывном выращивании бессменной кукурузы на зерно и пшеницы. Майлз и Браун (*Miles and Brown*, 2011) считают, что это является следствием нехватки питательных веществ. Только под тимофеевкой произошло последующее увеличение ОВП в верхнем слое почвы. В целом, чем длительнее севооборот, тем меньше потери С и N. Наиболее значительные изменения были зарегистрированы в верхнем 20-сантиметровом слое почвы, уменьшаясь в более глубоких слоях почвы. Мобильный С был выше на делянках с более высоким содержанием ОВП; навоз и растительные остатки с более узким соотношением С:N обеспечивают большее содержание лабильного углерода.

Те же тенденции наблюдались на делянках *Morrow Plots* на сельскохозяйственной опытной станции Иллинойского университета (*Urbana*, США). Содержание ОВП и общего азота было выше на делянках в севообороте кукуруза – овес – клевер, по сравнению с кукурузой – овсом и бессменной кукурузой. Образцы почвы, отобранные в 1904 г. и регулярно в последующие годы вплоть до 1992 г., показали значительное снижение содержания углерода и азота. Общий азот значительно снизился за период 1904–1953 гг., затем стабилизировался; никаких дальнейших изменений не было обнаружено до 1973 года, когда было отмечено увеличение ОВП и общего азота (*Aref and Wander*, 1998). Также было отмечено, что отношение С:N со временем уменьшилось до уровня ниже 12, что может быть результатом повышенной гумификации ОВП или большего содержания фиксированного азота.

4.2.5. Орошение

Особенности полива в другом длительном полевом опыте в Бельцах показаны в таблице 4.17. Потери ОВП из слоя почвы 0–100 см без орошения и с орошением были почти идентичными в течение 44 лет на неудобренных делянках в севообороте, включающем 50% люцерны (24,9 и 24,2 т С/га, около 11% от исходных запасов). Применение 13 т навоза на гектар севооборотной площади снизило потери до 11,8 и 18,7 т/га как на фоне без орошения, так и с орошением соответственно. Независимо от удобрения и орошения 25–31% углерода было потеряно из верхнего 40 см слоя почвы и 69–75% из слоя 40–100 см.

На неудобренных делянках потери общего азота также были равнозначными как с орошением, так и без него: 4,41–4,47 т/га (более или менее 17% от исходного запаса, таблица 4.18). На неудобренных делянках потери составили 2,95 т/га без орошения и 5,59 т/га с орошением. Из суммарных потерь на всех

Таблица 4.16. Соотношение C:N для разных слоев почвы при разных системах удобрения в севообороте на типичном черноземе, 1970-2008 гг.

Слои почвы (см)	Начальные запасы (т N/га)	Системы удобрения в севообороте							
		Неудобрен. (контроль)	НРК ₁	НРК ₂	НРК ₃	Навоз +НРК ₁	Навоз +НРК ₂	Навоз +НРК ₃	Навоз
0-20	10.6	13.2	14.0	11.9	13.1	10.4	12.7	11.5	10.3
20-40	9.8	12.1	12.6	12.6	12.3	11.3	12.6	12.1	11.2
40-60	9.9	12.8	9.8	8.9	9.1	11.7	11.4	11.8	11.3
60-80	7.3	11.8	8.4	7.8	7.5	9.3	10.6	10.6	11.6
80-100	7.0	11.4	6.8	8.4	8.9	11.1	9.2	9.1	9.4

Таблица 4.17. Изменение запасов ОВП на типичном черноземе при орошении на разных фонах удобренности, 1968-2009 гг.

Слой почвы (см)	Исходный запас ОВП (т/га)	Без орошения				С орошением			
		Неудобрен.		Удобрен.		Неудобрен.		Удобрен.	
		т/га	±	т/га	±	т/га	±	т/га	±
0-20	70.1	62.6	-7.5	64.1	-6.0	62.6	-7.5	66.2	-3.9
20-40	58.8	59.5	+0.7	61.6	+2.8	58.8	0	58.0	-0.8
40-60	46.3	40.8	-5.5	43.3	-3.0	39.7	-6.6	41.6	-4.7
60-80	28.8	22.4	-6.4	27.2	-1.6	23.5	-5.3	23.2	-5.6
80-100	20.2	14.0	-6.2	16.2	-4.0	15.4	-4.8	15.6	-3.7
0-100	224.2	199.3	-24.9	212.4	-11.8	200.0	-24.2	205.5	-18.7
Изменение относительно исходного запаса, %	11			5		11		8	
Годовые потери ОВП (т/га)	0.59			0.28		0.58		0.45	
Потери С из общих потерь по слоям почвы									
0-40	т/га	-6.8		-3.2		-7.5		-4.7	
	%	27		27		31		25	
40-100	т/га	-18.1		-8.6		-16.7		-14	
	%	73		73		69		75	

Таблица 4.18. Изменение запасов общего азота (т/га) на типичном черноземе при орошении на разных фонах удобренности, 1968-2009 гг.

Слой почвы (см)	Исходный запас N (т/га)	Без орошения				С орошением			
		Неудобрен.		Удобрен.		Неудобрен.		Удобрен.	
		т/га	±	т/га	±	т/га	±	т/га	±
0-20	6.36	5.57	-0.79	6.10	-0.26	5.30	-1.06	5.38	-0.98
20-40	6.01	5.43	-0.58	5.51	-0.50	5.43	-0.58	5.02	-0.99
40-60	5.32	4.44	-0.92	4.52	-0.80	4.36	-0.96	4.27	-1.05
60-80	4.42	3.28	-1.14	3.84	-0.58	3.19	-1.23	2.97	-1.45
80-100	3.30	2.32	-0.98	2.49	-0.81	2.66	0.64	2.18	-1.12
0-100	25.41	21.04	-4.41	22.46	-2.95	20.94	-4.47	19.82	-5.59
Изменение от исходного запаса (%)									
		-17		-12		-18		-22	
Ежегодные потери N (т/га)									
		-0.018		-0.072		-0.109		-0.136	
Потери N от общих потерь по слоям почвы									
0-40	т/га	-1,37		-0.76		-1.64		-1.97	
	%	31		26		37		35	
40-100	т/га	-3,04		-2.19		-2.83		-3.62	
	%	69		74		63		65	

делянках 26–35 процентов составили потери из верхнего слоя почвы 40 см и 63–74 процента из слоя почвы 40–100 см. Потери углерода и азота из слоев почвы аналогичны, но орошение привело к большим потерям по сравнению с другими вариантами опыта. Соотношение C:N шире для орошаемых деленок (таблица 4.19), что означает, что для предотвращения потерь азота следует добавлять больше углерода (*Boincean and others*, 2014).

4.2.6. Обработка почвы

В степях и прериях пахотное земледелие сопровождалось потерями 20–70 процентов исходного ОВП. Причины такого резкого изменения следующие:

- поступление углерода от возделывания однолетних культур значительно меньше, чем от многолетних трав, особенно в более глубокие слои почвы;
- вспашка подвергает большую поверхность почвы интенсивному окислению, особенно в результате разрушения природных структурных агрегатов, что увеличивает скорость разложения ОВП;
- отсутствие растительного покрова в течение более коротких или более длительных периодов подвергает почву воздействию солнца, ветра и дождя, повышая температуру поверхности почвы и вызывая эрозию почвы.

Михайлова и др. (2000) определили на типичном черноземе под Курском (Россия) наибольшее снижение содержания углерода и азота в почве за 50 лет после распашки целины. Потери ОВП для верхних 10 см варьировали от 38 до 43 процентов, потери общего N – в пределах 45–53 процентов, но отмечены также и значительные потери по всему профилю почвы, обусловленные меньшей плотностью корней под однолетними культурами, меньшим выщелачиванием органических веществ по профилю почвы и более высокой температурой почвы. Примечательно, что скашивание сена без вспашки не снижает запасы гумуса, что подчеркивает важность корневой системы для поддержания запасов гумуса на естественных пастбищах (прериях).

Нам не хватает длительных полевых опытов на черноземе, которые охватили бы весь спектр консервативной системы земледелия (КСЗ), включая нулевую обработку почвы (*zero tillage*) по всему профилю почвы. Это проводится лишь в настоящее время в НИИПК *Selectia*, но в полевых опытах предыдущего поколения сокращение использования плуга с отвалом до одного раза только в севообороте по сравнению с ежегодной вспашкой удвоило запас ОВП. В аналогичных условиях канадских прерий результаты нескольких многолетних полевых опытов, обобщенные *Vanden Bygaart* и др. (2003, 2010), показывают, что нулевая обработка почвы приводит к значительному увеличению ОВП, но их данные ограничены верхним 15-сантиметровым слоем почвы. Современные метаанализы и обзоры показывают, что при нулевой обработке почвы значительное увеличение запасов ОВП ограничивается верхними 20–30 см, а в подпочве наблюдается небольшое изменение – по крайней мере, во влажных, умеренных условиях (*Powlson* и др. 2014). Однако реализация всего пакета КСЗ с различными севооборотами, покровными культурами и поддержанием поверхностного покрова является другим вопросом (*Chenu and others*, 2018), и, независимо от какого-либо преимущества в секвестировании

Таблица 4.19. Соотношение C:N для различных слоев почвы при удобрении и орошении типичного чернозема, 1998-2009 гг.

Слои почвы (см)	Исходные запасы (т/га)	Без орошения		С орошением	
		Неудобренные	Удобрённые	Неудобренные	Удобрённые
0-20	11.0	11.2	11.8	11.8	12.3
20-40	9.8	11.0	11.2	10.8	11.6
40-60	8.7	9.2	9.6	9.1	9.7
60-80	6.6	6.8	7.1	7.4	7.8
80-100	6.1	6.0	6.5	5.8	7.2

углерода, у него есть много и других преимуществ: защита почв от стихии, улучшение структуры почвы и водопроницаемой способности, следовательно, и сокращение эрозионных потерь, а также значительное сокращение расхода топлива, затрат на оборудование и рабочую силу (*Dent, 2019*).

Связывание углерода требует, чтобы поглощение углерода превышало объем его минерализации (потерь). Это может быть достигнуто с помощью севооборотов с многолетними травами и пастбищами, с применением всех видов органических растительных остатков и навоза, с покровными культурами и с минимальной или нулевой обработкой почвы. Но КСЗ, или КСХ (консервативная система сельского хозяйства) требует квалифицированных фермеров, которые в настоящее время не получают платы за предоставление экосистемных и социальных услуг. С точки зрения устойчивости, а также экосистемных услуг черный пар следует избегать как один из самых разрушительных методов ведения сельского хозяйства (*Лыков, 1979; Plaza-Bonilla и др. 2015; Vanden Bygaart и др. 2003, 2010*).

Экспериментальные данные не подтверждают тот факт, что в черном пару накапливается больше осадков для следующих сельскохозяйственных культур: только 10–35% выпавших дождевых осадков доступны для следующей культуры, что меньше, чем накапливается под культурами. Длительные полевые опыты по севооборотам не продемонстрировали каких-либо преимуществ урожайности озимой пшеницы по черному пару по сравнению с другими предшественниками. С другой стороны, год пара – это год без производства; это способствует неэффективной потере ОВП; лишенная растительности почва уязвима для эрозии почвы, особенно во время ливневых дождей. Напротив, регулярное поступление свежего органического вещества поддерживает активное (стабильное) органическое вещество почвы, которое улучшает качество почвы и урожайность, и в значительной степени способствует оказанию экосистемных услуг. Начиная с низкого уровня, требуется 40–50 лет, чтобы прийти к новому устойчивому состоянию ОВП: чем больше поступление углерода и чем медленнее его разложение, тем короче переход на новое устойчивое состояние органического вещества почвы.

4.3. Изменение климата

Человечество сильно нарушило естественные экосистемы и уменьшило их устойчивость, особенно после промышленной революции. Климат Земли изменился: мы уже живем в условиях более экстремальной, более непредсказуемой погоды и стрессов для земельных и водных ресурсов (IPCC, 2018). Долгосрочные последствия могут наблюдаться только в длительных полевых опытах, которые приобретают все большее значение для устойчивого развития, смягчения последствий изменения климата и адаптации к этим изменениям.

Понимание роли органического вещества почвы является ключом к пониманию нашего воздействия на экосистемы. Природные экосистемы поддерживают баланс между поступлением и расходом органического вещества почвы как основного источника энергии для жизни в почве и его многочисленными и разнообразными функциями. Сельское хозяйство коренным образом изменило баланс: в настоящее время объем получаемой продукции значительно превышает объем возвращаемых в почвы ресурсов, причем не только на распашку целины и на вырубку леса, но и на все последующие операции. В давно вырубленных лесах и распаханных пастбищах первоначально высокие выбросы CO_2 сократились, и агроэкосистемы переходят в другое состояние с меньшими запасами ОВП, которое может быть или не быть в равновесном состоянии.

Процесс может идти в обоих направлениях, в зависимости от величины вложений (инпутов), температуры и осадков. Метаанализ запасов ОВП и изменений в землепользовании по 74 публикациям показал, что в среднем запасы ОВП сократились на 42% до глубины менее 100 см после замены естественного леса сельскохозяйственными культурами; при переходе с естественной злаковой растительности на сельскохозяйственные культуры потери составили 59%; запасы увеличились на 8% при переходе от естественного леса к пастбищу; на 19% при переходе от сельскохозяйственных культур к пастбищам и на 53% при переходе от сельскохозяйственных культур к вторичным лесам (*Guo and Gifford, 2002*).

О влиянии запасов ОВП на глобальные температуры и о том, как температура может влиять на разложение ОВП, существует много мнений и споров, но нет единого мнения (*Kirschbaum, 2000; Davidson and Janssens, 2006*). Вероятно, скорость разложения органического углерода будет увеличиваться с повышением температуры, если процесс не остановится из-за нехватки почвенной воды. Принимая во внимание потепление климата в Европе, *Olesen and Bindi (2002)* считают, что страны северного полушария выиграют от более продолжительного вегетационного периода и смогут увеличить спектр сельскохозяйственных культур; в странах южного – будут наблюдаться более частые и более сильные засухи. Более сильное разложение органического вещества почвы, особенно зимой, приведет к увеличению вымывания нитратов весной; возможно повышение степени поражения зимующими вредителями и болезнями; более высокая интенсивность осадков и в то же время большее испарение увеличат риск эрозии и засоления почвы. Но существует большая неопределенность – в то время как климатические модели последовательны в отношении повышения температуры, они несовместимы в отношении осадков.

Историческая минерализация почвенного органического вещества внесла около 50 Гт С в атмосферный CO_2 , но выбросы сельским хозяйством в настоящее время относительно скромны по сравнению с другими выбросами парниковых газов (Paustian и др., 1997). Межправительственная группа по изменению климата подсчитала, что на сельское хозяйство приходится 20 процентов ежегодного увеличения антропогенных выбросов парниковых газов (IPCC, 2010). Это не означает, что роль почвы больше не важна в борьбе с глобальным потеплением. Напротив, способность истощенных почв улавливать углерод из атмосферы все больше и увеличение ОВП могло бы иметь большое значение для качества почвы и воды: увеличить урожайность и остановить эрозию почвы. Кроме того, системы устойчивого земледелия могут внести большой вклад в смягчение последствий изменения климата путем сокращения зависимости от энергоемких промышленных химикатов. Эквивалентные выбросы углерода (кг С/кг) для производства некоторых промышленных ресурсов следующие:

N удобрения	0,9–1,8
P удобрения	0,1–0,3
K удобрения	0,1–0,2
гербициды	1,7–12,6
инсектициды	1,2–8,1
фунгициды	1,2–8,0

Обработка почвы также напрямую влияет на выбросы CO_2 за счет потребления дизельного топлива: эквивалентная эмиссия углерода/га для отвальной вспашки составляет 15,2 кг С/га, а для дискования – 5,8 кг С/га (Lal, 2004). Замена полного переворачивания почвы менее агрессивной обработкой или, что еще лучше, нулевой обработкой почвы имеет много других преимуществ, которые мы обсудим в отдельной главе.

Battye and others (2017) спрашивают: «Является ли азот следующим углеродом?» Влияние N_2O и NO в сельском хозяйстве на общие выбросы парниковых газов обычно недооценивают. Учитывая азот из синтетических удобрений, органический N из экскрементов животных и растительных остатков, а также количество биологической фиксации N, *Moiser* и др. (1998) считают, что интенсивность выбросов антропогенного CO_2 и азота во второй половине XX века была практически одинаковой. Вполне возможно, что выбросы окислов азота в сельском хозяйстве компенсируют любые выгоды от поглощения углерода. Это возвращает нас к оптимальному соотношению между биологическим азотом и азотом из минеральных удобрений.

Включение бобовых в севооборот снижает потребность в синтетических азотных удобрениях (*Crews and Peoples*, 2004). Азот, полученный за счет биологической фиксации, не нуждается в невозобновляемых источниках энергии, поэтому, изменяя соотношение между различными культурами в севооборотах, можно сократить выбросы CO_2 в атмосферу. *Yantai Gan* и другие (2011) оценили углеродный след в производстве и распределении основных полевых культур, выращиваемых в канадских прериях (общий объем выбросов парниковых газов, выраженный в эквиваленте CO_2). Они установили, что производство и применение азотных удо-

брений составило 57–65 процентов, разложение растительных остатков – 16–30 процентов, а 5–27 процентов было потрачено на производство фосфорных удобрений, пестицидов и другие полевые операции. Они также обнаружили, что три азотфиксирующие культуры (нут, чечевица и горох) имеют сниженную эмиссию (выброс) CO_2 на 65% по сравнению с рапсом и яровой пшеницей; а выбросы твердой пшеницы после бобовых были на 46% меньше, чем после зерновых. *Drinkwater* и др. (1998) предлагают сократить потребление энергии на 50% для севооборота на основе введения бобовых культур (без азота из минеральных удобрений) по сравнению с традиционными системами. Кроме того, они обнаружили, что остатки бобовых культур (с более низким соотношением C:N) способствуют большему накоплению ОВП; азот бобовых культур имеет более высокую иммобилизацию в микробной биомассе и в ОВП по сравнению с азотом из минеральных удобрений.

Углеродный след сельского хозяйства может быть дополнительно уменьшен за счет увеличения ОВП, особенно в подпочве. В северных регионах 80–90 процентов корневой массы находятся в верхних 30 см: на юге только 50 процентов (*Jackson* и др., 1996), что говорит о том, что глобальное потепление может препятствовать укоренению в верхнем слое почвы. Количество и распределение ОВП зависит от вида растительности, а также от температуры. Среднее содержание ОВП в слое 0–20 см под кустарниками, лугами и лесами составляет 33%, 42% и 50% соответственно от общего количества в верхнем метре почвы (*Jobbágy and Jackson*, 2000). Таким образом, существуют возможности для управления соотношением между надземной частью и корнями вместе с вертикальным распределением корней.

Поглощение углерода связывает три важнейшие для общества проблемы: изменение климата, устойчивое развитие и деградацию земель, включая потерю биоразнообразия (*Lal*, 2004; *Franzluebbers*, 2012). Удаление ОВП означает увеличение выбросов парниковых газов, деградацию почв и ослабление продовольственной безопасности. Засушливые земли уже страдают от истощенных запасов ОВП и большого дефицита продовольствия, но *Lal* (2016) установил, что увеличивая ОВП в верхнем слое почвы на 1 т/га, можно увеличить урожайность кукурузы на 100–300 кг/га, сорго на 20–50 кг/га, а просо на 30–70 кг/га. Ключевые меры, которые необходимо принять, следующие:

- расширение площадей под консервативной системой земледелия с оптимальным сочетанием основных и промежуточных культур в севообороте, совместные посевы в рамках более диверсифицированной системы земледелия и нулевая обработка почвы;
- соблюдение севооборотов с большим разнообразием сельскохозяйственных культур, в том числе многолетних бобовых и трав с глубокими корнями;
- интеграция растениеводства и животноводства для более рационального использования энергии и питательных веществ;
- предотвращение уплотнения – уменьшение аэрации почвы может увеличить выбросы N_2O на 20–40 процентов (*Snyder and others*, 2009);
- лучшее управление выпасом, расширение площадей под лесоводством и агролесоводством.

Проще сказать, чем сделать! Например, невозможно накопить запасы углерода в почве, когда других питательных веществ не хватает. По данным Междуна-

родного центра по применению удобрений, для секвестрации 1 Гт органического углерода необходимо иметь 80 миллионов тонн азота, 20 миллионов тонн фосфора и 15 миллионов тонн калия (Lal 2004). Но потенциал для компенсации выбросов ископаемого топлива путем секвестрации углерода составляет 0,4–1,2 Гт/год, или 5–15% глобальных выбросов, что само по себе стоит того, чтобы обеспечить продовольственную и водную безопасность и остановить эрозию почвы.

В последнее время проявляется интерес к древесному углю (*Biochar*) как к новому удобрению почвы. Это древесный уголь, образующийся при медленном сгорании древесины или другой биомассы (Atkinson и др. 2010). Древесный уголь является непроницаемым, и его пористая структура может поглощать воду и питательные вещества, а также питать грибы и бактерии, которые повышают эффективность низких доз фосфатов. Предполагается, что он был источником плодородия черной (*terra preta*) почвы бассейна Амазонки, а также многих огородных почв в Европе (Lehman and others, 2010). Поскольку черноземы уже достаточно снабжены этими качествами, они вряд ли выиграют от любого возможного добавления древесного угля, но это хороший знак того, что фермеры и общество в целом начали осознавать важность уменьшения негативных последствий потери ОВП.

Устойчивое управление почвой устраняет разрыв между потенциальным и фактическим урожаем сельскохозяйственных культур (Anderson и др., 2016 г.). Урожайность зерновых может быть увеличена с сегодняшних 1–2 т/га на большей части Африки и 2–4 т/га в Восточной и Южной Европе, до средней урожайности по Западной Европе – 7–9 т/га. Это позволило бы вернуть деградированные земли в полунатуральные условия для более высоких показателей секвестрации С и улучшения экосистемных и социальных услуг. Тогда возникнут возможности для сокращения потерь продуктов питания, которые в настоящее время составляют до 40 процентов выращенной на полях продукции. Краткосрочные меры по адаптации систем земледелия к глобальному потеплению могут включать: изменение сроков сева, подбор сортов сельскохозяйственных культур с разной продолжительностью вегетационного периода, комплексное управление питательными веществами и вредителями, покровные культуры, нулевую обработку почвы, улучшение режимов орошения и повышение эффективности использования удобрений с использованием азота и др. Liu и другие (2016) подсчитали, что повышение эффективности использования азотных удобрений может сократить на 36–65 процентов общие выбросы от применения синтетических азотных удобрений, которые включают потери от выбросов в атмосферу NH_3 и NO_x , выщелачивание нитратов за пределы корневой зоны, а также потери в процессе производства, транспортировки и хранения азотных удобрений. Опять же, Gan и др. (Gan and others, 2011) обнаружили, что при выращивании твердой пшеницы, следующей за твердой пшеницей, выбрасывается 251 кг CO_2 экв/га от внесения азотных удобрений, но после бобовых – только 162 кг CO_2 экв/га. Заменить азот из минеральных удобрений биологической азотфиксацией – это непростая задача, но включение азотфиксирующих бобовых культур в севооборот – это шаг в правильном направлении.

Более длительные меры включают: принятие более разнообразных систем ведения сельского хозяйства; значительное расширение площадей под КСХ с нулевой обработкой почвы; селекцию сортов сельскохозяйственных культур, более

устойчивых к вредителям и болезням, жаре и нехватке воды; и, безусловно, Святой Грааль – это многолетние злаковые культуры (*Crews and others*, 2018). Поддержание большого количества растительных остатков на поверхности почвы будет все более полезным с ростом температуры и неустойчивыми осадками – высокие температуры поверхности создают водоотталкивающий слой и уменьшают увлажнение. Недостатком глобального потепления является, конечно, более высокая скорость минерализации ОВП, которая может или не может быть компенсирована количеством поступающего углерода в почву. Анализ жизненного цикла может определить пути сокращения углеродного следа по всей пищевой цепочке: например, путем смещения в рационе питания в сторону растительного белка при меньшем потреблении или отказе от белка животного происхождения.

Киотский протокол был глобальной инициативой по увеличению поглощения углерода из атмосферы деревьями. Он не рассматривал почвы, но секвестрация углерода при нулевой обработке почвы в течение многих лет признавалась углеродным рынком Альберты (см. главу 8), а Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата начиная с 2020 года предусматривает пропаганду 4 на 1000 частей ОВП – это ежегодное увеличение ОВП на 0,4% за счет совершенствования практики сельского и лесного хозяйства. Если это можно сделать и если это будет сделано, Киотский протокол сыграет важную роль в сдерживании глобального потепления (*Frank* и др. 2017). Мы рассматриваем этот вопрос в главе 8. Общая сельскохозяйственная политика Европейского союза также признает многочисленные и разнообразные роли сельского хозяйства в ландшафте и в обществе и может способствовать достижению этой цели, поощряя фермеров за предоставленные экологические и социальные услуги, а также поддерживая производство продуктов питания.

4.4. Выводы

1. Основными причинами резкой утраты ОВП черноземными почвами были частые отвальные вспашки и замена многолетней растительности однолетними культурами. Самые большие потери произошли непосредственно сразу после распашки целинных почв, и они продолжают и все еще значительны, не только в поверхностном слое, но и по всему почвенному профилю. В традиционных системах земледелия ежегодные поступления органического углерода не компенсируют ежегодные потери.
2. Для достижения равновесного состояния требуется 25–30 лет под лугом, чтобы восстановить исходные запасы ОВП до статуса естественной многолетней злаковой растительности.
3. Способность почвы обеспечить потребность сельскохозяйственных культур в азоте зависит от величины лабильной фракции ОВП, а также от скорости ее разложения или качества ОВП. Включение многолетних бобовых культур в севообороты обогащает весь профиль почвы С и N.
4. Различные системы удобрения имеют очень разные возможности для восстановления плодородия почвы. Минеральные удобрения приводят к потерям

общего азота, и больше всего из слоя почвы 40–100 см, по сравнению с самыми верхними 40 см. В длительных полевых опытах ни одна из систем удобрения не покрывала ежегодные потери общего количества N. На типичном черноземе Бельцкой степи в Молдове внесение 15 т/га навоза в севообороте обеспечило восполнение дефицита ОВП, тогда как использование только минеральных удобрений удвоило ежегодные потери ОВП по сравнению с неудобренными деланками; потери ОВП выше в подпочве (40–100 см), чем в верхних слоях почвы (0–40 см): 66–72% по сравнению с 28–34% соответственно.

5. Орошение приводит к увеличению потерь органического углерода почвы и общего азота. Внесение 13 т/га навоза крупного рогатого скота в севооборот с 50% люцерны недостаточно для компенсации ежегодных потерь ОВП и общего N для слоя почвы 0–100 см. Потери как C, так и N выше из подпочвы, чем из верхнего слоя.
6. Выбросы CO₂ в атмосферу могут быть сокращены путем использования меньшего количества индустриальных вложений (инпутов), процесс производства которых сопровождается выбросом большого количества парниковых газов. Выбросы могут быть значительно сокращены или даже полностью исключены путем сочетания биологической фиксации N в качестве альтернативы минеральным удобрениям; соблюдения севооборота, что требует меньше химикатов для «борьбы» с болезнями и сорняками, а также замену отвального плуга минимальной обработкой почвы или, что еще лучше, нулевой ее обработкой.
7. Чем выше способность почвы улавливать углерод, тем ниже выброс CO₂ в атмосферу. Нет почв с большей емкостью, чем чернозем.

Список литературы

- Albrecht W. A. 1979. *The Albrecht papers, vol. II-III*. New edition, 2011, Acres USA, Greeley CO
- Anderson W. C., Johansen & K.H.M. Siddique 2016 Addressing the yield gap in rainfed crops: a review. *Agronomy for sustainable development* 36, 2-13
- Aref S. & M.M. Wander 1998 Long-term trends in corn yield and soil organic matter in different crop sequences and soil fertility treatments on the Morrow Plots. *Advances in Agronomy* 62, 153-197
- Atkinson CJ, JD Fitzgerald & NA Hipps 2010 Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant Soil* 337, 1-18
- Balesdent J, I Basile-Doelsh, JI Chadoeuf and others 2017 Renouvellement du carbon profond des sols cultivés: une estimation par compilation de données isotopiques. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment (Liège)* 21, 1-12 (French)
- Battye W, VP Aneja & WH Schlesinger 2017 Is nitrogen the next carbon? *Earth's Future* 5, 894-904
- Boincean BP, MP Martea, AI Ungureanu & PM Hropotinschi 2014 Long-term field experiment with irrigation on the Balti chernozem. 233-250 in DL Dent (editor) *Soil as World Heritage*, Springer, Dordrecht
- Cassman KG & RR Harwood 1995 The nature of agricultural systems: food security and environmental balance. *Food Policy* 20, 5, 439-45
- Conant RT, K Paustian & ET Elliott 2001 Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. *Ecological Applications* 11, 2, 343-355
- Cenu C, DA Angers, P Barré and others 2018 Increasing organic stocks in agricultural soils: knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research* <https://doi.org/10.1011/jstill.208.04.011>

- Cotrufo MF, MD Wallenstein, CM Boot and others 2013 The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable organic matter? *Global Change Biology* 19, 988-995
- Crews TE & MB Peoples 2004 Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture Ecosystems and Environment* 102, 279-297
- Crews TE & BE Rumsey 2017. What agriculture can learn from native ecosystems in building soil organic matter: a review. *Sustainability (Switzerland)* 9, 4, 1-18
- Davidson EA & IA Janssens 2006 Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Reviews. *Nature* 440 (7081), 165-173
- Dent DL 2019 Green water, used by plants, managed by farmers. 29-44 in JA Allan, M Keulertz, A Colman and B Bromwich (editors) *The Oxford Handbook on Water Food and Society*. Oxford University Press, New York
- Drinkwater LE, P Wagoner & M Sarrantonio 1998 Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Letters to Nature* 396 (6708) 262-265
- Ellert BH & JR Bettany 1995 Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science* 75, 521-538
- Frank S, P Havlik, JF Soussana and others 2017 Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? *Environmental Research Letters* 12, 1-14
- Franzluebbers AJ 2012 Grass roots of carbon sequestration. *Carbon Management* 3, 1, 9-11
- Freibauer A, MDA Rounsevell, P Smith & J Verhagen 2004 Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1-23
- Gan Y, C Liang, C Hamel and others 2011 Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas. A review. *Agronomy and Sustainable Development* 31, 643-656
- Guo LB & RM Gifford 2002 Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology* 8, 345-360
- IPCC 2010 *The carbon cycle*. <http://www.climate-science.gov/Library/stratplan2003/final/annexfigure7-1.htm>
- IPCC 2018 Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Incheon, Republic of Korea, October 8th
- Jackson RB, J Canadell, JR Ehleringer and others 1996 A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108, 2, 389-411
- Jobbágy EG & RB Jackson 2000 The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10, 2, 423-436
- Kirschbaum MUF 2000 Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biogeochemistry* 48, 21-51
- Kuzyakov Y & G Domanski 2000 Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 421-431
- Lal R 2004 Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 34, 1623-1627
- Lal R 2016 Feeding 11 billion on 0.5 billion hectare of area under cereal crops. *Food and Energy Security* 5, 4, 239-251
- Lal R, RF Follet, BA Stewart & JM Kimble 2007 Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science* 172, 12, 943-955
- Lehmann J, MC Rillig, J Thies and others 2011. Biochar effects on soil biota. A review. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1812-1836
- Liu C, H Cutforth, Q Chai & Y Gan 2016 Farming tactics to reduce the carbon footprint of crop cultivation in semiarid areas. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36, 6, 2-16
- Magdoff F & H van Es 2010 *Building soils for better crops. Organic matter management*, 3rd edition. SARE, University of Maryland
- Mikhailova EA, RB Bryant, II Vassenev and others 2000 Cultivation effects on soil carbon and nitrogen contents at depth in the Russian Chernozem. *Soil Science Society of America Journal* 64, 738-745
- Miles RJ & JR Brown 2011 The Sanborn Field Experiment: implications for long-term soil organic carbon levels. *Agronomy Journal* 103, 1, 268-278

- Mosier A, C Kroeze, CD Nevison and others 1998 Closing the global N_2O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52, 225-248
- Olesen J & M Bindi 2002 Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16, 239-262
- Paustian K, O Andren, HH Janzen and others 1997 Agricultural soils as a sink to mitigate CO_2 emissions. *Soil Use and Management* 13, 230-244
- Paustian K, J Six, ET Elliott & HW Hunt 2000 Management options for reducing CO_2 emission from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48, 1, 147-163
- Plaza-Bonilla D, JR Arrúe, C Cantero-Martinez and others 2015 Carbon management in dryland agricultural systems. A review. *Agronomy and Sustainable Development* 35, 4, 1319-1334
- Powlson DS, CM Stirling, MI Jat and others 2014 Limited potential for no-till agriculture for climate change mitigation through soil carbon sequestration. *Nature Climate Change* 4, 678-683
- Rasse DP, C Rumpel & M-F Dignac 2005 Is soil carbon mostly root carbon? Mechanism for a specific stabilization. *Plant and Soil* 269, 1-2, 341-356
- Sauerbeck D, H Helali & S Zohnen 1982 Consumption and turnover of photosynthates in the rhizosphere depending on plant species growth conditions. *Proc 12th International Congress ISSS, New Delhi, vol. 1*, 239-249
- Snyder CS, TW Bruulsema, TL Jensen & PE Fixen 2009 Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133, 247-266
- Stewart CE, K Paustian, RT Conant and others 2007 Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry* 86, 1, 19-31
- UNFCCC 1997, 2018 *Kyoto protocol to the UN Framework Convention on Climate Change, December 2012 amendment COP18, Dohar*. UNFCCC Secretariat, Bonn
- VandenBygaart AJ, EG Gregorich & DA Angers 2003 Influence of agricultural management on soil organic carbon: a compendium and assessment of Canadian studies. *Canadian Journal of Soil Science* 83, 863-886
- VandenBygaart AJ, E Bremer, BG McConkey and others 2010 Soil organic carbon stocks on long-term agroecosystem experiments in Canada. *Canadian Journal of Soil Science* 90, 543-550
- West TO & J Six 2007 Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change* 80,1-2, 25-41
- Боинчан Б.П. Экологическое земледелие в Республике Молдова (Севообороты и органическое вещество). Кишинев: Штиинца, 1999. 299 с.
- Лыков А.М. Органическое вещество почвы и плодородие дерново-подзолистых почв в условиях интенсивного сельского хозяйства. Диссертация, д-ра сельскохозяйственных наук, М. 1977.

Глава 5

СЕВООБОРОТ

В результате проведенных им исследований он принял меры по улучшению посевов. Вместо того чтобы выращивать три невыгодных культуры подряд, он выращивал только две и держал землю на пастбищах в течение двух лет. Эти изменения, которые происходили медленно, но верно, привели к заметным изменениям в улучшенной почве.

Lady Sterling on Coke of Norfolk in 1776

Аннотация. Севооборот – самый дешевый и эффективный способ повышения урожайности и плодородия почвы. Принципы севооборота включают: 1) разнообразие культур во времени и пространстве на полевом и ландшафтном уровнях – для повышения внутреннего потенциала сельскохозяйственных культур подавлять сорняки, вредителей и болезни; 2) чередование культур с различной глубиной корнеобитания; 3) каждый полный севооборот должен поддерживать или увеличивать содержание органических веществ в почве. На черной земле в степях и прериях очень выгодно соблюдать правильное размещение культур по предшественникам, а также важно соблюдение сроков возврата культур на прежнее место возделывания в севообороте. Для озимой пшеницы снижение ее урожайности из-за размещения по поздно убираемому предшественнику, такому как кукуруза на зерно, по сравнению с рано убираемым предшественником, таким как смесь вики с овсом на зеленую массу, в два раза больше прибавки от применения удобрений: почти 2 т/га по сравнению с менее чем 1 т/га. Доля почвенного плодородия в формировании урожайности составляет 90 процентов при размещении озимой пшеницы по рано убираемому предшественнику, но только 50 процентов в бессменной озимой пшенице; худшее здоровье (качество) почвы должно быть компенсировано более высокими дозами применяемых минеральных удобрений и пестицидов.

Удобрения не могут заменить севооборот. Культуры, выращенные в бессменных посевах, дают меньший урожай, чем культуры, выращенные в севообороте, как на неудобренных, так и на удобренных участках. Эффективность использования азота и воды значительно выше в севооборотах. Эффект севооборота (разница между урожайностью культур в севообороте и в бессменных посевах) больше для озимой пшеницы и сахарной свеклы по сравнению с кукурузой на зерно и подсолнечником.

Степи становятся суше. Это повышает значимость воды, удерживаемой в более глубоких слоях почвы, и увеличивает ценность таких культур, как люцерна с глубокими и обильными корневыми системами. Однако сельскохозяйственные культуры с глубокими корнями и длительным вегетационным периодом высушивают почву больше, чем культуры с поверхностной корневой системой и с коротким вегетационным периодом, поэтому в севообороте разрыв во времени между культурами с глубоко проникающей корневой системой должен составить не менее двух лет, чтобы обеспечить пополнение запасов почвенной влаги, особенно в условиях повторяющихся засушливых лет. Как ни странно, от дождя и таяния снега накапливается меньше воды под черным паром, чем под посевом различных культур.

Различные культуры обладают различной способностью защищать почву от эрозии. Соотношение между культурами сплошного способа посева с лучшей почвозащитной способностью и пропашными культурами, которые меньше защищают от эрозии почву, следует определять с учетом крутизны склона на уровне ландшафта.

Ключевые слова: принципы построения севооборота, эффект севооборота, предшественники, сроки возврата культур на прежнее место в севообороте, эффективность использования воды, эффективность использования азота, удобрение.

5.1. Введение

Мир изменился в конце XVIII века. Значительные заслуги в этом принадлежат землевладельцу из Норфолка Томасу Коку (*Thomas Coke*). После тщательного изучения опыта фермерских хозяйств он заменил последовательное чередование зерновых культур на чередование одного года из трех черного пара или двух лет под смесью клевера со злаками. Позже он ввел Норфолкский четырёхпольный севооборот: озимая пшеница – турнепс – яровой ячмень с подсевом смеси злаковых и клевера. При старой системе половина или треть пахотных земель были залежными в течение одного года; урожайность озимой пшеницы в Англии составляла менее 0,8 тонны/га; один урожай из четырех был плохим, а один год из пяти – катастрофой. С севооборотом не было необходимости в черном паре; сорняки и вредители контролировались интервалом во времени между посевами; кормовые культуры позволяли содержать скот в течение зимы, увеличивая запас навоза на ферме. К концу столетия урожайность улучшилась до стабильного среднего значения более 1,2 т/га; в первой половине XIX века урожаи выросли до 1,6 т/га, и увеличивающееся население страны было накормлено и одето (*Broadberry and others*, 2009). С тех пор севооборот стал центральным элементом устойчивого земледелия – нет другой такой дешевой, но столь же эффективной практики. К сожалению, значение севооборота было забыто во время индустриализации сельского хозяйства во второй половине прошлого века, и сейчас мы наблюдаем последствия – экономические, экологические и социальные.

Не существует единого подхода и формулы для лучшего севооборота. Это зависит от почвы и климата, а также от экономических условий на региональном

уровне и от отдельной фермы, но чем больше разнообразие культур во времени и пространстве, тем больше выгода от севооборота. Цель состоит в том, чтобы предотвратить, а не реагировать на последствия, такие как недостаток воды и питательных веществ, истощение почвенного органического вещества, поражение сорняками, вредителями и болезнями, а также эрозия самой почвы. Современные системы земледелия, которые зависят от мощной техники и интенсивного использования индустриальных вложений (инпутов), таких как минеральные удобрения и пестициды, безусловно, увеличивают урожайность, но ценой игнорирования экологических и социальных последствий, которые в наши дни требуют особого внимания.

Сравнивая традиционное сельское хозяйство с биологически более разнообразными системами, Кремен и Милс (*Kremen and Miles*, 2012) определили двенадцать преимуществ большего биоразнообразия:

- качество почвы;
- менеджмент питательных веществ;
- водоудерживающая способность;
- «борьба» с сорняками;
- контроль заболеваний;
- «борьба» с вредителями;
- опыление;
- связывание (секвестрация) углерода;
- эффективность использования энергии;
- устойчивость к засухе;
- устойчивость к сильным ветрам и проливным дождям;
- продуктивность.

Интенсивная механизация и химизация сельского хозяйства создали однообразие в отличие от разнообразия: концентрация и специализация, большие поля и упрощение севооборотов вплоть до монокультуры. Впечатляющие ранние успехи побудили фермеров и исследователей отойти от севооборотов. Технологические инновации заменили устоявшиеся биологические и агрономические правила – без особого рассмотрения их воздействия на почву и ее сложных взаимосвязей в севообороте и более обширной окружающей средой. Эти результаты привели к снижению эффективности использования энергии, ускорению деградации почвы, загрязнению почвы и воды и выбросам парниковых газов. Социальные последствия, которые сейчас становятся все более очевидными, включают потерю доступа к земле для бедных людей, потерю местной продовольственной безопасности и разрушение или исчезновение сельских общин (*Karlen* и др., 1994; *Franzluebbers* и др., 2014). Но отрицательная сторона тщательно маскировалась и утаивалась в течение нескольких лет, и неудивительно, что инновации увеличили зависимость сельского хозяйства от индустриальных вложений (инпутов).

Решение всех этих вопросов требует более тесного участия гражданского общества. Продовольственная безопасность и одновременная с этим охрана окружающей среды не могут быть достигнуты только за счет увеличения производства продуктов питания; они также требуют сокращения пищевых отходов, изменения привычек питания и запрет на использование пахотных земель исключительно для

производства биотоплива. По данным ФАО (2017 г.), использование растительного масла в качестве биотоплива ежегодно увеличивается на 23%, а потребление в качестве пищи – только на 5%; поэтому тропические леса вырубаются, чтобы освободить место под плантации масличных пальм для последующего производства биодизельного топлива, более четверти урожая сахарного тростника используется для производства биоэтанола, а в штате Огайо 60 процентов кукурузы превращается в биоэтанол. Это не незаконно. Это не аморально. Но должен быть баланс между энергетическими культурами, производством продуктов питания и волокон и окружающей средой. И для каждого места – некоторые ограничения.

Проектирование жизнеспособных и эффективных севооборотов – самая трудоемкая и творческая работа, необходимая для достижения устойчивого управления почвой и хозяйством. Эти две стороны не могут быть разделены. Севооборот обеспечивает лучшие экосистемные и социальные услуги только тогда, когда соблюдаются основополагающие принципы агрономии и экологии – лучше тратить время и силы на этапе проектирования севооборотов, чем потом платить высокую цену за ошибки. На каждой отдельной ферме это требует учета плодородия различных полей, того, насколько хозяйство оснащено рабочей силой и оборудованием, рынками сбыта для продукции. Каждый из следующих принципов будет по-разному значим для каждого отдельного хозяйства (фермы), но их следует анализировать в целом, не пренебрегая одним или другим:

- 1) большее разнообразие культур во времени и в пространстве в пределах каждого поля на уровне ландшафта;
- 2) чередование культур с различной глубиной проникновения корневой системы;
- 3) восстановление плодородия почвы;
- 4) повышение внутреннего потенциала сельскохозяйственных культур и почв подавлять сорняки, вредителей и болезни и избегать усталости почвы;
- 5) предотвращение эрозии почвы и засухи.

5.2. Принципы построения севооборотов

5.2.1. Разнообразие сельскохозяйственных культур

Разнообразные севообороты имитируют естественные экосистемы – но только в течение полного севооборота. Необходимы дополнительные совместные исследования экологов и агрономов, чтобы лучше понять преимущества природных экосистем, в частности их устойчивость, и применить это понимание для практического использования в системах с несколькими культурами. Например, проверенные методы совместного выращивания кукурузы, фасоли и тыквы или смесей различных сортов зерновых и бобовых культур обеспечивают более высокую урожайность в результате более эффективного использования воды, питательных веществ и солнечной энергии (Gliessman, 2001). Рисунки 5.1–5.8 иллюстрируют некоторые длительные полевые опыты с севооборотами на типичном черноземе в Научно-исследовательском институте полевых культур «Селекция» (НИИПК *Selectia*) в Бельцкой степи (Республика Молдова).

Свооборот может «бороться» с эрозией почвы, дефицитом воды и питательных веществ и заражением сорняками, вредителями и болезнями. Тем не менее, в нем необходимо соблюдать требования различных культур в отношении предшествующих культур и сроков возврата одной и той же культуры на прежнее поле в свообороте. В НИИПК *Selectia* проведена оценка различных сельскохозяйственных культур в качестве предшественников для всех культур, выращиваемых в стране, чтобы фермеры, ознакомившись с этими данными, могли избежать ненужных затрат на «борьбу» с сорняками, вредителями и болезнями или на дополнительное внесение удобрений (Боинчан, 1999). Например, зерновые колосовые культуры являются отличными предшественниками для разных культур, но не для самих себя. Овес и рожь особенно полезны в качестве санитарных и покровных культур, однако частое выращивание, частое их возвращение на прежнее место выращивания в свообороте чревато недостатком азота и большей опасностью поражения сорняками и болезнями, передающимися через почву. Для подсолнечника, люцерны, табака и сои наиболее важно соблюдать сроки возврата на прежнее место возделывания в свообороте; в случае с подсолнечником: чем дольше период между последовательными посевами подсолнечника, тем ниже уровень заражения паразитическими сорняками, а следовательно, тем выше урожай.

Урожайность в свооборотах выше, чем в бессменных посевах, как на удобренном, так и на неудобренном фонах; эта разница называется эффектом свооборота (Karlen и др.;1994; Боинчан, 1994; *Boincean*, 2014). Правильный выбор предшественников очень важен для озимой пшеницы, потому что рано убираемые предшественники потребляют меньше воды и, таким образом, позволяют почве накапливать больше влаги для получения оптимальных всходов посевов озимой пшеницы. Таблица 5.1 показывает, что наилучшие урожаи достигаются при посеве озимой пшеницы после смеси яровой вики и овса, выращенных на зеленую массу, по сравнению с посевом после кукурузы на силос или кукурузы на зерно.

Таблица 5.1. Доля почвенного плодородия в формировании урожайности озимой пшеницы (%) в свообороте и в бессменных посевах, НИИПК *Selectia*, среднее за 1994-2016 гг.

Предшественники	Удобренный фон	Неудобренный фон
Смесь вики и овса на зеленую массу	89.9	100
Кукуруза на силос	63.9	100
Кукуруза на зерно	62.9	100
Озимая пшеница, бессменно	50.5	100

Озимая пшеница, высеваемая после смеси вики с овсом на зеленую массу, обеспечила получение 4,56 т/га на неудобренных делянках и 5,0 т/га на удобренных делянках; после кукурузы на силос урожай составил 3,36 т/га без удобрений и 4,56 т/га на делянке с удобрениями; после кукурузы на зерно – 2,67 т/га без удобрений и 3,66 т/га с удобрениями. Самые низкие урожаи были у озимой пшеницы в бессмен-

ных посевах: 1,98 т/га без удобрений и 2,96 т/га с удобрениями. Прирост урожая от удобрений меньше для посевов озимой пшеницы после рано убираемых предшественников и больше – после поздно убираемых предшественников: 0,46 т/га (10%) для озимой пшеницы, посеянной после смеси овса и вики на зеленую массу; 1,21 т/га (36%) после кукурузы на силос; 0,99 т/га (37%) после кукурузы на зерно и 0,98 т/га (50%) – для бессменной озимой пшеницы. Потеря урожая от посева после поздно убираемого предшественника равна или превышает дополнительный прирост урожая от удобрений. Удобрение просто уменьшает снижение урожайности после поздно убираемого предшественника. Озимой пшенице после рано убираемого предшественника требуется меньше минеральных удобрений.

Понятия плодородие и удобрение почвы часто путают. Увеличение нормы вносимых минеральных удобрений не снижает роль почвенного плодородия в формировании урожайности; доля почвенного плодородия в формировании урожайности на удобренных участках выше для озимой пшеницы, посеянной после вико-овсяной смеси на зеленую массу и гораздо меньше для поздно убираемых предшественников и наименьшая – в условиях бессменных посевов. Таким образом, эффективность использования азотных удобрений самая низкая для озимой пшеницы, посеянной после вико-овсяной смеси на зеленую массу, более высокая – после поздно убираемых предшественников и в бессменных посевах озимой пшеницы (таблица 5.2). Но удобрения не могут компенсировать эффект поздно убираемых предшественников.

Таблица 5.2. Эффективность использования азота озимой пшеницей, посеянной после разных предшественников и в бессменных посевах, НИИПК *Selectia*, среднее за 1994–2016 гг.

Предшественники	Прибавка в урожае от удобрений (т/га)	N, вынесенный с прибавкой урожая (кг/га)	N, внесенный с минеральными удобрениями (кг/га)	Эффективность применения N, (%)
<i>Севооборот</i>				
Вико-овсяная смесь на зеленую массу	0.46	13.8	90	15
Кукуруза на силос	1.21	36.3	90	40
Кукуруза на зерно	0.99	29.7	90	33
<i>Бессменные посевы</i>				
Озимая пшеница	0.98	29.4	90	33

Аналогичным образом, эффективность использования воды выше для озимой пшеницы, посеянной после рано убираемых предшественников, чем после поздно убираемых предшественников или в условиях бессменной культуры (таблица 5.3): озимая пшеница, посеянная после вико-овсяной смеси на зеленую массу, потребляет 414,9 т почвенной воды для формирования одной тонны зерна, но 723,9–622,3 т

воды при посеве после кукурузы на зерно или в бессменных посевах соответственно. Эта же урожайность достигается при более низких дозах минеральных удобрений, что позволяет избежать потерь от вымывания и выбросов парниковых газов. Однако как водопотребление, так и эффективность использования питательных веществ минеральных удобрений ограничены сорняками, вредителями и болезнями и особенно засухой. Многие исследователи считают, что более высокая эффективность использования воды и питательных веществ в севооборотах, по сравнению с бессменной культурой, обусловлена улучшением работы корневой системы, включая благотворное влияние микоризы (Karlen и др., 1994, 2006).

Доля почвенного плодородия в формировании урожайности озимой пшеницы, посеянной после рано убираемых предшественников в севообороте (90%), подчеркивает важность мер по улучшению качества почвы. В контексте севооборота улучшение качества почвы поддерживает целый ряд экосистемных и социальных услуг, которые не могут быть обеспечены в бессменных посевах культур. Работая на темно-коричневом черноземе (*Dark brown chernozem*) в Канаде, Soon and others (2006) обнаружили, что азот из минеральных удобрений составляет всего 14–23% от общего потребления азота яровой пшеницей, поэтому минерализация почвенного органического вещества, безусловно, является основным источником азота для питания растений. Они также обнаружили, что удобрения были более эффективными в засушливые годы из-за меньшей скорости минерализации органических веществ почвы во время засухи.

Таблица 5.3. Эффективность использования воды озимой пшеницей, посеянной после разных предшественников в севообороте и в бессменных посевах, НИИПК *Seleçia*, среднее за 2004–2013 гг.

Предшественники	Запасы почвенной влаги весной (мм)	Запасы почвенной влаги после уборки урожая (мм)	Потребление почвенной влаги (мм)	Урожай (т/га)	Эффективность использования воды (т воды на т зерна)
<i>Севооборот</i>					
Смесь вики с овсом на зеленую массу	360.2	162.7	197.5	4.76	414.9
Кукуруза на силос	328.4	146.6	181.8	3.62	502.2
Кукуруза на зерно	430.4	157.5	272.9	3.77	723.9
<i>Бессменные посевы</i>					
Озимая пшеница	364.9	186.3	178.6	2.87	622.3

Таблицы 5.4–5.10 иллюстрируют влияние севооборота и значимость плодородия почв для разных культур в длительных полевых опытах, проведенных в

НИИПК *Selectia*. Сахарную свеклу выращивали в разных звеньях шестипольного севооборота (таблица 5.4): вико – овес (на зеленую массу) – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза (на силос) – озимая пшеница – сахарная свекла. Реакция на удобрение была практически одинаковой в обоих случаях, но с тенденцией к снижению урожайности во втором звене севооборота. Самые низкие урожаи были получены в бессменных посевах сахарной свеклы, как на удобренных, так и на неудобренных участках. Рост урожаев от удобрений был в три раза выше в бессменной сахарной свекле по сравнению с севооборотом (93 процента по сравнению с 30–32 процентами), а эффект от севооборота огромен: снижение урожайности в бессменной сахарной свекле по сравнению с урожаем в севообороте на неудобренных и удобренных участках составляет 21,8 т/га (75%) и 23,9 т/га (64%) соответственно.

Таблица 5.4. Урожайность сахарной свеклы в разных звеньях севооборотов и в бессменных посевах, НИИПК *Selectia*, среднее за 1994–2016 гг.

Звено севооборота	Удобрение		± от удо- брений, т/ га и%	Снижение урожайности относительно звена севоо- борота: вика и овес – озимая пшеница – сахарная свекла	
	Неудо- бренный	Удобен- ный		Неудобрен- ный	Удобренный
Севооборот					
Смесь вики с овсом – озимая пшеница – сахарная свекла	28.9	37.6	+8.7/30%	-	-
Кукуруза на силос – озимая пшеница – сахарная свекла	26.4	34.9	+8.5/32%	-2.5/9%	-2.7/7%
Бессменные посевы					
Сахарная свекла	7.1	13.7	+6.6/93%	-21.8/75%	-23.9/64%

Доля плодородия почв в формировании урожайности на удобренных участках в севообороте составила 76–77%; для бессменной сахарной свеклы – 52% (таблица 5.5). Меньшая доля почвенного плодородия в формировании урожая в бессменных посевах объясняется снижением доступности питательных веществ, вызванным нарушением трансформации органического вещества почвы (ОВП). Большая доля плодородия почвы в формировании урожая для сахарной свеклы в севообороте требует ежегодной компенсации потерь ОВП в результате минерализации, в противном случае запасы ОВП уменьшаются.

Таблица 5.5. Доля плодородия почв в формировании урожая сахарной свеклы (%) в севообороте и в бессменных посевах, НИИПК *Selectia*, среднее за 1994–2016 гг.

Предшественники	Удобренный	Неудобренный
<i>Севособорот</i>		
Смесь вики с овсом на зеленую массу – озимая пшеница – сахарная свекла	76.9	100
Кукуруза на силос – озимая пшеница – сахарная свекла	75.6	100
<i>Бессменные посевы</i>		
Сахарная свекла	51.8	100

Кукуруза на зерно слабо реагирует как на севооборот, так и на удобрения (таблица 5.6). Урожай имеет тенденцию к снижению в звене севооборота вико-овсяная смесь на зеленую массу – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза на зерно, относительно другого: кукуруза на силос – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза на зерно, в обоих случаях – как на неудобренных, так и на удобренных участках (на 0,12 и 0,27 т/га соответственно). Прибавка от удобрения в первом севообороте составила 0,40 т/га, а во втором – 0,25 т/га. Таким образом, рано убираемые предшественники для озимой пшеницы не только приводят к росту урожайности озимой пшеницы по сравнению с поздно убираемыми предшественниками, но и приносят пользу следующим культурам в севообороте: +2,5 и 2,7 т/га сахарной свеклы для удобренных и неудобренных участков соответственно; +0,12 и 0,27 т/га для кукурузы на зерно на удобренных и неудобренных участках соответственно.

В предыдущей главе мы обратили внимание на снижение запасов ОВП под бессменной кукурузой на зерно по сравнению с кукурузой на зерно, выращиваемой в севообороте; несмотря на это, урожайность удобренной бессменной кукурузы на зерно практически не отличается от урожайности в севооборотах (5,21 т/га и 5,15–5,42 т/га соответственно). Это пример маскирующего влияния урожайности на плодородие почвы.

Бессменные посевы кукурузы дают плохие урожаи на неудобренных участках: прибавка урожая от внесения удобрений составила 1,70 т/га (48%), поэтому снижение урожайности бессменной кукурузы на удобренных участках относительно первого звена севооборота составило 1,50 т/га (30%). Плодородие почвы вносит огромный вклад в формирование урожая кукурузы на зерно в севообороте (93–95%), поэтому кукуруза почти не реагирует на удобрения. Доля плодородия почвы в формировании урожая меньше в бессменной кукурузе: 67% (таблица 5.7). При использовании минеральных удобрений и новых гибридов кукурузы урожаи бессменной кукурузы могут достигать тех же значений, что и в севообороте, но при больших производственных затратах. С научной точки

Таблица 5.6. Урожай кукурузы на зерно в различных звеньях севооборотов и в бессменных посевах, НИИПК *Selectia*, среднее за 1994–2016 гг.

Звено севооборота	Фон удобренности		Прибавка от удобрений, т/га и %	Снижение урожайности относительно звена севооборота: смесь вики с овсом на зеленую массу – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза на зерно	
	Удобренный	Неудобренный		Удобренный	Неудобренный
Севооборот					
Смесь вики с овсом на зеленую массу – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза на зерно	5.02	5.42	+0.40/8%	-	-
Кукуруза на силос – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза на зерно	4.90	5.15	+0.25/5%	-0.12/2%	-0.27/5%
Бессменные посевы					
Кукурузы на зерно	3.51	5.21	+1.70/48%	-1.51/30%	-0.21/4%

Таблица 5.7. Доля плодородия почв в формировании урожая кукурузы на зерно (%) в севообороте и бессменных посевах, НИИПК *Selectia*, среднее за 1994–2016 гг.

Предшествующая культура	Удобренная	Неудобренная
<i>Севооборот</i>		
Сахарная свекла	92.6	100
Сахарная свекла	95.1	100
<i>Бессменные посевы</i>		
Кукуруза на зерно	67.4	100

зрения нам необходимо понять отсутствие реакции на удобрения в севообороте. Мы обнаружили более высокую распространенность корневой гнили в бессменной кукурузе, которая может снизить урожайность и способствовать неэффективному использованию воды и питательных веществ.

По сравнению с использованием минеральных удобрений, применение органических удобрений в разнообразных севооборотах – в отличие от бессменных культур или упрощенных севооборотов, таких как кукуруза/соя – увеличило извлечение N на 42% для всех культур и почв (*Kremen and Miles, 2012*). Дальнейшие исследования почвенной эндомикоризы нужны для того, чтобы выяснить способность корней различных культур устанавливать симбиоз с грибами и влияние различных агротехнических факторов на этот потенциал.

Подсолнечник требует строгого чередования в севообороте; эффект севооборота составляет 0,61 т/га (32%) на неудобренных полях и 0,58 т/га (28%) на удобренных (таблица 5.8).

Таблица 5.8. Урожайность подсолнечника (т/га) в севооборотах и в бессменных посевах, НИИПК *Seleçtia*, среднее за 1994–2016 гг.

Севооборот/ бессменные посевы	Предшественник подсолнечника	Фон удобренности		± от удобрений (т/га и%)	Снижение урожая относительно севооборота	
		Неудобренные	Удобренные		Неудобренные	Удобренные
Севооборот	Озимая пшеница	1.91	2.10	+0.19/10%	–	–
Бессменные посевы	Подсолнечник	1.30	1.52	+0.22/17%	-0.61/ 32	-0.58/ 26%

Как и кукуруза на зерно, подсолнечник почти не реагирует на удобрение: прибавка урожайности от удобрений составила 0,19 т/га (10%) в севообороте и 0,22 т/га (17%) в бессменных посевах. Соответственно доля плодородия почв в формировании урожайности составляла 86% в бессменных посевах и 91% в севообороте (таблица 5.9).

Таблица 5.9. Доля плодородия почвы в формировании урожая подсолнечника (%) в севообороте и в бессменных посевах, НИИПК *Seleçtia*, среднее за 1994–2016 гг.

Севооборот/ в бессменные посевы	Предшественники	Фон удобренности	
		удобренный	неудобренный
Севооборот	Озимая пшеница	91.0	100
Бессменные посевы	Подсолнечник	85.5	100

Ориентация на максимальную урожайность сельскохозяйственных культур приводит к разрушению почвенного плодородия. В то же время экспериментальные данные о значительной доле почвенного плодородия в формировании урожая свидетельствует о том, насколько важно поддерживать плодородие почвы. *Heichel* (1987), цитируемый *Karlen* и др. (1994), обнаружил, что даже соя в двухлетнем севообороте с кукурузой, получала всего 40 процентов общего азота за счет азотфиксации и 60 процентов – из почвы. В таблице 5.10 сравниваются данные в бессменных посевах и в севооборотах с семью и десятью полями как на удобренных, так и на неудобренных землях. Чем больше количество полей и чем больше разнообразие культур в севообороте, тем выше урожайность, за исключением кукурузы, которая практически не реагирует на севооборот.

Таблица 5.10. Эффект севооборота на неудобренных землях длительного полевого опыта с 7 и 10 полями в НИИПК *Selectia*, среднее за 1994–2016 гг.

Культуры	Бессменные посева	7-польный севооборот			10-польный севооборот		
		т/га	±		т/га	±	
			т/га	%		т/га	%
Озимая пшеница	1.98	3.98	+2.0	101	4.56	+2.58	130
Сахарная свекла	7.1	21.40	+14.3	201	28.9	+21.8	307
Кукуруза на зерно	3.51	5.10	+1.59	45	5.02	+1.51	43
Подсолнечник	1.30	1.38	+0.08	6	1.91	+0.61	47

Та же картина просматривается из данных одного из самых старых длительных полевых опытов, проведенных в США, в *Sanborne Field*, университете в *Missouri* (таблица 5.11). Через 30 лет более высокие урожаи были получены в 6-летнем севообороте, чем в 3-летнем, а также по сравнению с бессменными посевами (Джонсон, 1927).

Таблица 5.11. Эффект севооборота на удобренных землях длительного полевого опыта с 7 и 10 полями, НИИПК *Selectia*, среднее за 1994–2016 гг.

Культуры	Бессменные посева	7-польный севооборот			10-польный севооборот		
		т/га	±		т/га	±	
			т/га	%		т/га	%
Озимая пшеница	2.96	4.46	+1.5	51	5.02	+2.06	70
Сахарная свекла	13.7	36.0	+22.3	163	37.6	+23.9	175
Кукуруза на зерно	5.21	5.55	+0.34	7	5.42	+0.21	4
Подсолнечник	1.52	1.65	+0.13	9	2.10	+0.58	38

Отказ от многопольных, разнообразных свооборотов в пользу короткой ротации и бессменных культур был стимулирован использованием удобрений и пестицидов, новых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур и заменой тягловых животных сельскохозяйственной техникой. В то же время это способствовало увеличению размеров полей и хозяйств – крупные предприятия более конкурентоспособны на рынке и в целом поддерживаются правительствами (Bullock, 1992). Но достигнутые на раннем этапе выгоды от новой системы земледелия были получены за счет истощения органического вещества почвы, ухудшения ее структуры, эрозии почвы и ускоренного глобального потепления. Экспериментальные данные, полученные в длительных полевых опытах по всему миру, убеждают, что невозможно компенсировать потерю эффекта свооборота даже при использовании удобрений, пестицидов и высокоурожайных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур. Свооборот – это не просто чередование культур; он включает также систему обработки и удобрения почвы, систему комплексной «борьбы» с вредителями и сорняками, системную механизацию; он ориентирован не только на урожайность, но и на восстановление плодородия почв. Норфолкский четырехпольный свооборот хороший тому пример. Чередование культур (клевер – озимая пшеница – турнепс – яровой ячмень с подсевом клевера) также является системой земледелия, в которой 3/4 сельскохозяйственных культур используется в качестве кормов для скота, навоз от которого используется для восстановления плодородия почвы.

5.2.2. Чередование культур с различной глубиной проникновения корневой системы

Культуры с разной глубиной проникновения в почву потребляют воду и питательные вещества из разных слоев почвы. Rotmistrov (1913), который много лет работал на опытной станции в Одессе, утверждал, что чередование культур с различной глубиной проникновения в почву является хорошей защитой от засухи. Данные многолетних полевых опытов по свооборотам и бессменным посевам, полученные в НИИПК *Seleçtia*, иллюстрируют различные запасы почвенной воды в черном паре и после уборки различных культур (таблицы 5.12, 5.13). Наибольшие запасы влаги были под черным паром и рано убираемыми предшественниками озимой пшеницы: смесь озимой вики с озимой рожью на зеленую массу, люцерна третьего года жизни после первого укоса. Более низкие запасы были обнаружены после кукурузы на зерно, кукурузы на силос и подсолнечника. Наименьший запас влаги отмечался после уборки сахарной свеклы.

Озимая пшеница, посеянная после различных предшественников, занимает промежуточное место, поэтому ее лучше сеять после рано убираемых предшественников, так как пополнение почвенной воды в верхнем горизонте почвы стимулирует дружное появление всходов, способствует развитию корней и кущению растений с осени, что обеспечивает хорошую перезимовку растений и устойчивость к любой последующей засухе. В этом секрет выращивания озимой пшеницы в степях. Запасы почвенной влаги в слое почвы 0–20 см составляют 28,5–32,6 мм после рано убираемых предшественников озимой пшеницы, таких как смесь ози-

Таблица 5.12. Запасы воды (в мм) в слое почвы 0-200 см под черным паром и после уборки различных культур. НИИПК *Selectia*, среднее за 1982–1991 гг.

Слой почвы (см)	Черный пар	Смесь озимой вики с озимой рожью на зеленую массу	Люцерна на третьем году жизни после первого укоса	Запасы воды					Бес-сменная кукуруза на зерно	Куку-руза на зерно в сево-бороте	Куку-руза на силос
				После смеси озимой вики с озимой рожью на зеленую массу	После люцерны на третий год жизни после первого укоса	После кукурузы на силос	После кукурузы на зерно	После озимой пшеницы в бессеменных посевах			
0-100	169.6	139.4	149.9	122.2	125.5	118.6	118.6	126.2	98,5	96.6	94.5
100-200	188.4	170.7	149.5	144.9	131.5	140.6	151.5	161.7	143.4	142.7	108.4
0-200	358.0	310.1	299.4	267.1	257.0	259.2	264.6	277.7	260.2	240.0	237.2

мой вики с озимой рожью на зеленую массу, смесь вики с овсом на зеленую массу, люцерна третьего года жизни после первого укоса, горох и даже озимая пшеница для повторного посева. Запасы влаги намного ниже после кукурузы на силос и кукурузы на зерно: 19,5–23,6 мм (таблица 5.14). Такая же ситуация наблюдается для слоя почвы 0–100 см.

Черный пар не дает никаких преимуществ по сравнению с другими рано убираемыми предшественниками. Его недостатки очень велики: он оставляет почву под воздействием прямого попадания солнечных лучей, ветра и дождя, ускоряет разложение органических веществ в почве, а целый год без урожая резко снижает экономический эффект. В условиях засушливых земель в Австралии обнаружено, что замена черного пара занятым паром повышает общую урожайность в севообороте, а также способствует более эффективному использованию дождей (Turner and others, 2004). В засушливом штате Монтана, США, Lenssen и др. (2007) обнаружили, что замена черного пара горохом повышает как эффективность использования дождей, так и эффективность использования азота. В предыдущей главе мы продемонстрировали, что устранение черного пара сокращает выбросы парниковых газов.

Глубоко укореняющиеся культуры, такие как подсолнечник и сахарная свекла, истощают запасы воды в более глубоких слоях почвы, но этот дефицит может быть восполнен за счет осадков в течение осенне-зимне-весеннего периода (таблица 5.15). После уборки подсолнечника 111,7 мм почвенной влаги могут накапливаться в верхних двух метрах почвы, но только 32,5 мм – после черного пара.

Таким образом, значительный дефицит почвенной влаги после глубоко укореняющихся культур может иметь как преимущества, так и недостатки: это зависит от того, как чередуются культуры. Лучше всего планировать так, чтобы за глубоко укореняющимися культурами следовали культуры с более мелкой корневой системой. При этом следует избегать посева сахарной свеклы после подсолнечника или наоборот. Принимая во внимание, что засуха может происходить два и более лет подряд, и что запасы влаги в более глубоких слоях почвы не будут пополняться до весны, разрыв во времени между глубоко укореняющимися культурами должен составлять не менее двух лет. Удивительно, но после люцерны накопление почвенной воды меньше, чем после черного пара: 28,3 мм по сравнению с 32,5 мм соответственно. Это говорит о том, что мы должны пересмотреть люцерну как предшественника для озимой пшеницы, убирая ее на третий год жизни после первого укоса. Скорее, мы могли бы использовать весь вегетационный период второго года жизни, а весной продолжить с культурой с неглубокой корневой системой, как кукуруза на зерно или кукуруза на силос.

Использование воды из разных слоев почвы разными культурами является еще одним ключевым вопросом (таблица 5.16). В среднем подсолнечник и сахарная свекла потребляли большую часть почвенной воды из верхних двух метров почвы: 130,9 мм и 163,4 мм соответственно; 49–52 процента воды используется из верхнего первого метра. Озимая пшеница, посеянная после кукурузы на зерно и после смеси озимой вики на зеленую массу и озимой ржи, потребляла 41,2 мм и 95,7 мм соответственно, с верхних двух метров почвы; доля почвенной воды, использованной из верхнего первого метра, составила 87 процентов и 51 процент соответственно. Таким образом, озимая пшеница после поздно убираемых пред-

Таблица 5.13. Запасы воды в почве (мм) в слое 0–200 см после черного пара и после уборки различных культур, НИИПК *Selectia*, среднее за 1982–1991 гг.

Культура/обработка почвы	Накопление почвенной влаги (мм)		
	0-100 см	100-200 см	0-200 см
Черный пар	169.6	188.4	358.0
Смесь озимой вики и озимой ржи на зеленую массу	139.4	170.7	310.1
Люцерна на 3-м году жизни после первого укоса	149.9	149.5	299.4
<i>Озимая пшеница</i>			
После вико-ржаной смеси на зеленую массу	122.2	144.9	267.1
После люцерны на 3-м году жизни после первого укоса	125.5	131.5	257.0
После кукурузы на силос	118.6	140.6	259.2
После кукурузы на зерно	118.6	151.5	264.6
После бессменной озимой пшеницы	126.2	161.7	277.7
Бессменная кукуруза на зерно	54.2	98.5	143.4
Кукуруза на зерно в севообороте	49.4	96.6	142.7
Кукуруза на силос	64.0	94.5	108.4

Таблица 5.14. Влияние различных предшественников на запасы воды в почве (мм) в слоях почвы 0-20 см и 0-100 см на период оптимальных сроков посева озимой пшеницы, НИИПК *Selectia*, среднее за 1982–1991 гг.

Слой почвы, (см)	Смесь озимой вики и озимой ржи на зеленую массу	Люцерна на третьем году жизни после первого укоса	Смесь овса и вики на зеленую массу	Черный пар	Горох на зерно	Бессменные посевы озимой пшеницы	Кукуруза на силос	Кукуруза на зерно
0-20	28.5	30.5	32.0	31.0	30.5	32.6	23.6	19.5
0-100	135.6	145	153.6	152.9	143.9	140.3	117.6	90.6

шественников потребляет меньше воды, чем после рано убираемых предшественников, и эта вода потребляется в основном из самого верхнего метрового слоя почвы, а не в равной степени из верхнего и ниже лежащего слоев почвы. В случае бессменной озимой пшеницы использование воды в почве очень неэффективно.

Таблица 5.15. Накопление почвенной влаги (мм) от осадков в осенне-зимне-весенний период после уборки урожая различных культур и черного пара, НИИПК *Selectia*, среднее за 1982–1991 гг.

Слой почвы (см)	Черный пар	Озимая овсянка и озимая рожь на зеленую массу	Люцерна на 3-м году жизни после первого укоса	Озимая пшеница					Бес-сменная кукуруза на зерно	Кукуруза на зерно в сево-бороте	Кукуруза на силос
				После смеси озимой вики и озимой ржи на зеленую массу	После люцерны, на третий год жизни после первого укоса	После кукурузы на силос	После кукурузы на зерно	После бес-сменной озимой пшеницы			
0-100	+16.8	+31.8	+17.6	+36.9	+38.0	+43.8	+35.9	+40.1	+54.2	+49.4	+64
100-200	+15.7	+20.9	+10.7	+35.8	+37.5	+34.0	+8.3	+42.5	+28.4	+22.7	+24.4
0-200	+32.5	+52.7	+28.3	+72.7	+75.5	+77.8	+44.2	+82.6	+72.1	+88.4	+84.2

Данные различия имеют решающее значение во время засухи. В 1986 году в период сильной засухи большинство сельскохозяйственных культур удвоило потребление воды: доля воды из слоя 0–100 см потребленной озимой пшеницей, посеянной после смеси озимой вики и озимой ржи на зеленую массу, составила 44% по сравнению со средним показателем в 51% за 1982–1991 годы. В случае озимой пшеницы, посеянной после кукурузы на зерно, количество потребляемой воды было в 2,4 раза больше, но, тем не менее, почти в одинаковой пропорции вода была извлечена с первого метрового слоя почвы – 89 процентов по сравнению со средним показателем в 87% за период 1982–1991 гг. Озимые зерновые культуры после рано убираемых предшественников более устойчивы, потому что они могут использовать воду из более глубоких слоев почвы. Таким же образом глубоко укореняющиеся культуры, такие как подсолнечник и сахарная свекла, увеличили долю потребления воды из слоя почвы 100–200 см по сравнению со слоем почвы 0–100 см. У кукурузы на зерно после сахарной свеклы увеличилось потребление воды в три раза по сравнению со средним показателем за 1982–1991 годы (144,4 мм по сравнению с 51,0 мм), но при этом было использовано из верхнего метрового слоя почвы всего 36 процентов по сравнению со средним показателем за 1982–1991 годы – 89 процентов. Бессменная кукуруза на зерно удвоила потребление воды, но сохранила то же соотношение воды, используемой из первого и второго метрового слоев почвы: 55 и 54 процентов соответственно.

Недостаточное внимание к тому, как разные культуры используют воду из разных слоев почвы, приводит к сельскохозяйственной засухе (Dent, 2019). Это проблема искусственно вызванная, но реальная, так как количество осадков в степях уменьшается. Устойчивость к изменению климата может быть повышена путем соблюдения требований сельскохозяйственных культур к предшественникам и изменения в севообороте, что увеличивает способность культур потреблять воду из более глубоких слоев почвы. Вплоть до 1980 года половину прироста урожая озимой пшеницы связывали с новыми сортами – полукарликами и наполовину – с улучшенной агрономической практикой. За последние два десятилетия только одна треть прироста урожая приходилась на новые сорта и две трети на улучшение агрономической практики (Turner, 2004). В условиях нашего изменяющегося климата агрономы должны работать с селекционерами для улучшения как состояния почвы, так и сортов сельскохозяйственных культур. Мы считаем, что новые сорта и гибриды сельскохозяйственных культур, адаптированные к местным условиям, с большей вероятностью будут развиваться с использованием местных генетических ресурсов, а также при производстве семян на местном уровне.

По вопросу о включении многолетних бобовых культур или смеси многолетних бобовых и злаковых трав в севооборот было много дискуссий. Многолетние травы сушат почву больше, чем однолетние, но в то же время они используют воду более эффективно. Родионовский Ф. К. (1953) обнаружил, что потребление воды озимой пшеницей и смесью люцерны и злаковых трав составляло 95,6 мм и 77,4 мм соответственно, но смесь люцерны и злаковой травы обеспечила получение почти вдвое больше общей биомассы – 11,2 и 20,8 т/га соответственно. По сравнению с озимыми злаками многолетние бобовые и злаковые травы накапливают больше воды из осадков в осенне-зимний и весенний периоды. Согласно Захарченко И. Г. (1960), многолетние бобовые и злаковые травы удовлетворяют 73–81% своей

Таблица 5.16. Потребление почвенной воды (мм) различными культурами из слоев почвы 0-100 см и 0-200 см в севооборотах и в бессменных посевах, среднее за 1982–1991 гг.

Культуры	Потребление почвенной влаги за 1982-1991			Потребление почвенной влаги в условиях засухи в 1986		
	0-200 см	0-100 см	доля 0-100 см слоя почвы в общем потреблении воды	0-200 см	0-100 см	доля 0-100 см слоя почвы в общем потреблении воды
<i>Озимая пшеница</i>						
После смеси озимой вики и озимой ржи на зеленую массу	95.7	49	51	187.6	83	44
После люцерны на третий год жизни после первого укоса	70.7	41.9	59	120.7	73.1	61
После бессменной озимой пшеницы	82.6	40.1	49	211.2	91.6	43
После кукурузы на силос	66.4	39.9	60	119.2	73.5	62
После кукурузы на зерно	41.2	35.9	87	115.4	102.2	89
<i>Кукуруза на силос</i>	56.3	55.7	99	86.8	86.8	100
<i>Кукуруза на зерно</i>						
После сахарной свеклы	51.0	45.2	89	144.4	51.3	35
Бессменная кукуруза на зерно	82.6	54.1	66	187.8	103.9	55
<i>Подсолнечник</i>	130.9	64.0	49	242.1	93.9	39
<i>Сахарная свекла</i>	163.4	84.6	52	254.1	112.2	42

потребности в воде из осадков в осенне-зимне-весенний период, тогда как озимая пшеница, посеянная после черного пара, использует только 27–33%.

Более глубокая и обильная корневая система многолетних растений по сравнению с однолетними культурами, обеспечивает более эффективное использование воды. Ридли и другие (*Ridley and others*, 2001) подсчитали, что в *Riverina* на юге Австралии со среднегодовым количеством осадков 600 мм вымывание воды происходит в однолетних посевах в 55 процентах случаев по сравнению только с 6 процентами годов при использовании люцерны.

Незадолго до широкомасштабного применения минеральных удобрений фермеры в штате Огайо выращивали много донника (*Melilotus spp*) в севообороте (*Hughes*, 1925; *Oakley*, 1925). Донник накапливает азот в корневой системе поздней осенью и ранней весной. При подсеве овса с донником общее количество азота в корнях составляло 3,6% осенью и 3,2% следующей весной; в тех же условиях люцерна накапливала только 2,8% и 2,2% общего азота соответственно. Задержка весной с заделкой донника в почву означает меньше азота в корнях и больше в надземных частях; кроме того, донник сушит почву, что проблематично для получения хороших всходов следующей кукурузы. Правильные сроки заделки донника в почву или другие методы контроля позволяют обогащать почву азотом и в то же время избегать чрезмерного расхода воды.

5.2.3. Восстановление органического вещества почвы

Севооборот должен увеличить запас органического вещества в почве. Важность органического вещества почвы как основного источника азота для питания сельскохозяйственных культур (75–95 процентов от общего количества азота, вынесенного сельскохозяйственными культурами) подтверждается многочисленными исследованиями, в том числе и нашими. Мы можем разделить культуры на две группы: те, которые улучшают плодородие почвы (многолетние травы) и те, которые истощают почву (однолетние культуры). Достижение устойчивости требует баланса в севообороте и на уровне всего хозяйства (фермы) между культурами, которые обогащают почву, и культурами, которые ее истощают. В XIX веке Ермолов А. С. (1879) и Лекутэ Э. (1889) оценивали способность культур к истощению почвы не по количеству питательных веществ, извлекаемых сельскохозяйственными культурами или их важности для почвы, а по количеству навоза, полученного из таких культур при использовании их в качестве корма. По этому критерию севооборот с хорошей пропорцией кормовых культур истощит почву меньше, чем севооборот с пропашными культурами.

Многолетние полевые опыты во всем мире доказывают, что даже идеальный севооборот с многолетними бобовыми или смесью бобовых и злаковых трав не может компенсировать ежегодные потери органического вещества почвы (т.е. Лыков и др., 2004) навоз все еще должен применяться. Конечный результат определяется соотношением между гумификацией и минерализацией органического вещества почвы. Нарушение почвы при её обработке способствует более интенсивному разложению органического вещества почвы. Все три компонента – чередование культур, удобрения и обработка почвы – связаны друг с другом, хотя их роли в поддержании плодородия почвы и формировании урожая различны.

Отдельно они не могут решить обе задачи, они могут делать это только вместе. История сельского хозяйства знает много примеров переоценки важности того или другого: переоценка химических веществ ознаменовала эпоху индустриализации сельского хозяйства; в более ранний период слишком много внимания уделялось обработке почвы без тесной связи с правильным чередованием сельскохозяйственных культур и удобрением почвы (Мальцев Т. С., 1983).

5.2.3.1. Бобовые культуры в свооборотах

В настоящее время, когда цены на сельскохозяйственную продукцию ниже, чем когда-либо, а цены на азотные минеральные удобрения резко возросли, эффективность применения азотных минеральных удобрений является большой проблемой (Boincean and Stadnic, 2012). Агроэкосистемы теряют азот из-за выщелачивания нитратов и растворенных органических соединений, а также из-за газообразных выбросов аммиака, окислов азота и N_2 (Goulding, 2000). При использовании удобрений всегда следует учитывать остаточный азот в почве, который может давать тот же урожай при меньшей норме минеральных удобрений. Лучший способ избежать несоответствия между минерализацией азота в почве и поглощением азота сельскохозяйственными культурами – это не оставлять почву голой (под паром), особенно поздней осенью и ранней весной, когда осадки превышают испарение. Только растительные остатки культур без активных корневых систем не могут остановить потери азота в результате вымывания.

Многолетние культуры имеют более продолжительный период роста и проникают глубже в почву, чем однолетние, но комбинация однолетних и многолетних культур в свообороте, например, посев зерновых культур между рядами бобовых, позволяет поглощать азот при восстановлении однолетних культур. Выбор покровных культур является важной мерой, принимая во внимание их химический состав, особенно соотношение C:N. В Институте земли в Салина, штат Канзас, США, изучают посевы смесей различных видов бобовых и злаковых трав с различным пространственным и временным потреблением питательных веществ. Установлено, что вымывание нитратов может быть уменьшено на 48–76 процентов при использовании люцерны или смеси люцерны и злаковых трав в качестве источника азота. Более того, Robertson и др. (2000), на которых ссылаются Crews and Peoples (2004), обнаружили, что индекс потенциала глобального потепления для выбросов $CO_2 + N_2O + CH_4$ был значительно ниже для системы на основе бобовых культур, чем для агроэкосистем, основанных на использовании удобрений.

Замена многолетних трав однолетними культурами привела к потере 30–60% первоначальных запасов органического вещества почвы (Crews and others, 2016). Однолетние и многолетние культуры имеют различные соотношения между надземной и подземной частями: однолетние растения распределяют 15–20% своего чистого первичного производства под землей, многолетние культуры – около 50%. Более того, многолетние культуры укореняются глубже. Для свооборота требуются не только разнообразные культуры, но и многолетние растения с глубокими корнями, которые выполняют несколько функций в системе

земледелия. Бобовые, особенно многолетние бобовые, фиксируют атмосферный азот посредством симбиоза их корней с ризобактериями (рис. 5.7). Это существенно снижает выбросы CO_2 и N_2O по сравнению с системами, основанными на использовании азота из минеральных удобрений, и снижает риск загрязнения подземных вод. Помимо своей ценности в качестве корма, бобовые могут обеспечивать достаточное количество биомассы для производства биогаза и способствовать секвестрированию углерода, особенно в глубоких слоях почвы. Наличие бобовых в севообороте сокращает потребность в минеральных азотных удобрениях, а также, благодаря более разнообразному севообороту, потребность в пестицидах. Потенциальный вклад бобовых в смягчения последствий глобального потепления был осознан лишь недавно: *Jensen* и др. (2012) обнаружили небольшую разницу между потерями N_2O из почвы с бобовыми и без бобовых из разных регионов и типов почв по всему миру ($1,29$ и $1,20 \text{ кг } \text{N}_2\text{O} - \text{N га}^{-1}$); но они рассчитали, что при производстве каждого $\text{кг } \text{NH}_3\text{-N}$ выделяется в атмосферу $0,7\text{--}1,0 \text{ кг } \text{CO}_2\text{-C}$ (эквивалентно $2,6\text{--}3,7 \text{ кг } \text{CO}_2$). С той же точки зрения, использование бобовых культур в качестве альтернативных источников энергии является хорошей идеей (*Jensen* и др., 2016 г.). Другое преимущество многолетних травянистых культур по сравнению с однолетними культурами заключается в лучшей синхронизации снабжения азотом как результат разложения растительных остатков и спроса или потребления культур (*Campbell* и др. 1995; *Crews and Peoples*, 2004, 2005).

Корни многолетних бобовых растений создают структуру и водопроницаемость в глубоких слоях почвы, создавая при своем распаде взаимосвязанные биопоры. Многолетние травы еще более эффективны, особенно в смесях, которые создают структуру как в верхнем, так и в более глубоких слоях (*Williams*, 1950–1952). Возможным недостатком является то, что биопоры также позволяют накапливать патогенные микроорганизмы и/или вымывать подвижные питательные вещества и пестициды непосредственно в подземные воды (*Cresswell and Kirkegaard*, 1995).

Однолетние и многолетние бобовые играют различные роли. В Европе однолетние бобовые культуры дают возможность восполнить дефицит белка в ежегодных кормах, который в настоящее время удовлетворяется за счет экспорта из Южной Америки. Однако, как правило, только многолетние бобовые культуры способствуют накоплению азота в почве. Однолетние бобовые культуры обычно выносят азота больше, чем оставляют в почве, потому что бобы, убранные на зерно, накапливают $75\text{--}85\%$ своего азота в семенах, которые удаляются с поля (*Peoples* и др. 2009; *Kessel and Hartley*, 2000). Это не относится к бобовым, которые используются в качестве зеленого удобрения или для выпаса скота в поле, когда весь азот возвращается в почву. Например, люцерна (*Medicago spp.*) первого года, используемая для выпаса или на сено, легко восстанавливается без повторного посева; каменистое семя остается в почве в течение севооборота, что является значительной экономией не только в семенах, но и во времени в течение критического периода посева (*Chatterton and Chatterton*, 1996).

Однолетние бобовые вносят вклад в запасы азота в почве посредством разложения корней и клубеньков, а также через корневые экссудаты. Опыты с меченым азотом показали большие вариации этого ризо-запасания азота – от 4 до 71%

от общего азота растений (*Fustec and others*, 2010). Это отчасти объясняет более высокую урожайность после бобовых культур по сравнению с небобовыми, но корневые экссудаты также трансформируют недоступные формы фосфора и делают их доступными для последующих культур. Однолетние бобовые занимают свое место в севооборотах также из-за пониженного энергопотребления и, как следствие, сниженного потенциала глобального потепления благодаря меньшему количеству минеральных удобрений для бобовых и других культур в севообороте, гербицидов и пестицидов, оптимальной обработке почвы и более слабому вымыванию азота в случае использования покровных культур (*Nemecek and others*, 2008). Добавление однолетних бобовых, таких как горох или чечевица, к севообороту на основе пшеницы повышает эффективность использования азота по сравнению с бессменной пшеницей, а севооборот с бобовыми культурами является более прибыльным. Лин и Чен (*Lin and Chen*, 2014), О'Ди и другие (*O'Dea and others*, 2015) и Кессл и Хартли (*Kessel and Hartley*, 2000) сообщают, что замена летнего пара на бобовые в звене пар – пшеница увеличивала азотообеспечивающую способность почвы и, следовательно, потребность в минеральных удобрениях была меньше.

В странах Африки к югу от Сахары, которые далеко от черноземья, выявлены те же тенденции, показанные в обзоре об остаточном влиянии зернобобовых культур в системах, основанных на зерновых (*Franke and others*, 2018): среднее увеличение урожайности на 0,49 т зерна/га (41% урожая злаков), но много также и различий – кукуруза оказалась более отзывчивой, чем просо или сорго. Все виды зернобобовых культур значительно повысили урожайность последующих зерновых культур. Остаточный эффект бобовых был уменьшен вдвое при использовании минерального азотного удобрения, но он все еще был значительным, что говорит о преимуществах, помимо накопления азота.

Биологическая фиксация азота как однолетними, так и многолетними бобовыми культурами может быть ограничена кислотностью почвы, высокой концентрацией доступного для растений азота, недостатком доступного фосфора и засухой (*Giller and Cadish*, 1995), поэтому необходимы меры для того, чтобы избежать такие обстоятельства.

5.2.3.2. Влияние севооборотов с бобовыми культурами на органическое вещество почвы

Влияние севооборота на связывание (секвестрацию) углерода обсуждалось в предыдущей главе. Здесь рассматривается вопрос о преимуществах разнообразных севооборотов для улучшения качества органического вещества почвы (ОВП). Хорошими показателями качества ОВП являются: водорастворимый в горячей воде углерод и стабильность агрегатов (*Haynes и др.*, 1991), фракции аминокислот почв со способностью минерализовать азот (*Mulvaney and others*, 2001). Бидербек и другие (*Biederbeck and others*, 1994) также перечислили подвижные С и N, минерализуемые С и N, С и N микробной биомассы.

В длительных полевых опытах в Айове и Висконсине Карлен и др. (*Karlen and others*, 2006) отбирали пробы почвы под бессменными культурами и в севооборотах, которые включали кормовые культуры. Они обнаружили более высокие

значения показателей качества почвы (и большую 20-летнюю среднюю прибавку) в разнообразных севооборотах, которые включали как минимум 3 года кормовых культур. Они также выступают за поддержку фермеров, которые поддерживают диверсифицированные севообороты из-за преимуществ для окружающей среды и общества – большее разнообразие культур в севооборотах приводит к более устойчивому спросу на рабочую силу и меньшему риску потерь из-за изменения климата и нестабильности рынка.

В Канаде Григорич и др. (*Gregorich and others*, 2001) сравнили качество и продуктивность почвы в севооборотах на основе бобовых (кукуруза – корнеплоды – 2 года люцерны) и бессменной кукурузы в течение 35 лет. Они обнаружили на 30–40% больше углерода на глубине 70 см в почве под севооборотом с бобовыми культурами по сравнению с почвой под бессменной кукурузой. Более того, качество ОВП было лучше при системе выращивания с использованием бобовых культур. В Саскачеване Кэмпбелл и др. (*Campbell and others*, 1991, 1992) определили влияние севооборотов и разных земледельческих приемов на ОВП, микробную биомассу и дыхание в черноземной почве. В севообороте с большим разнообразием сельскохозяйственных культур, включая многолетние бобовые и однолетние бобовые культуры в виде зеленого удобрения, качество растительных остатков определяло увеличение общего содержания органического углерода, дыхания, углерода и азота микробной биомассы. В 15-летнем исследовании различных систем земледелия Дринкватер и др. (*Drinkwater and others*, 1998) доказали преимущество большего разнообразия сельскохозяйственных культур, которое включало многолетние бобовые культуры, в связывании углерода и азота, в увеличении продуктивности сельскохозяйственных культур и качества окружающей среды. Система на основе бобовых культур сократила вымывание азота и, благодаря 50-процентному сокращению использования энергии, – выбросы CO_2 в атмосферу. Они также пришли к выводу, что качество растительных остатков является более важным, чем общее их количество.

Остается открытым вопрос, может ли дополнительное секвестрирование углерода и азота компенсировать выбросы парниковых газов, связанные с применением минеральных удобрений. Халворсон и др. (*Halvorson and others*, 1999) оценили долгосрочные эффекты повышения нормы минеральных удобрений в системе выращивания на засушливых землях без вспашки (*no-till*). Они обнаружили значительное увеличение поступлений растительных остатков и, следовательно, содержания С и N в поверхностном слое почвы, но более высокие нормы минеральных удобрений способствовали большему увеличению количества надземных остатков по сравнению с подземными (корневыми) остатками.

5.2.4. Предупреждение эрозии почвы и засухи

Эрозия почвы и засуха являются двумя сторонами одной и той же медали – обе они вызваны плохой структурой почвы и недостаточным покрытием поверхности почвы растительностью или растительными остатками. Универсальное уравнение потери почвы (*Wischmeier and Smith*, 1965) и пересмотренное Универсальное уравнение потери почвы (*Renard and others*, 1997) включают шесть факторов:

- R – эрозионность (смываемость почвы), вызванная ливнями и стоком ливневых вод;
- K – эрозийность почвы;
- L – длина склона;
- S – градиент уклона;
- C – коэффициенты потерь почвы (предшествующее использование земли, покрытие почвы, шероховатость поверхности и влажность почвы);
- П – сельскохозяйственные практики.

Восприимчивость почвы к эрозии определяется ее эрозийностью (структура, текстура, водоудерживающая способность, инфильтрация) и покрытием почвы (биомасса, покров поверхности, разнообразие видов); все это в руках фермера. Климатическая эрозионность (осадки, скорость ветра, водный и энергетический баланс) и рельеф местности (градиент, длина, форма) вряд ли могут быть изменены, но методы ведения сельского хозяйства должны учитывать их. Севообороты могут помочь, но их необходимо проектировать на ландшафтном уровне, чтобы предусмотреть оптимальные методы организации и управления земельными ресурсами, которые предупреждают эрозию. Например, в Республике Молдова факторы, способствующие эрозии почвы, включают: проливные дожди, выпадающие в мае и июне; склоны, занимающие около 80% территории страны; преобладание интенсивно вспаханных пахотных земель в структуре сельскохозяйственных угодий; высокую долю пропашных культур в посевной площади; большие поля, пригодные для механизированных работ. К сожалению, методы ведения сельского хозяйства игнорируют эти условия, и эрозия почвы усиливается. Пауэр (Power, 1990) обнаружил, что урожайность на сильно эродированных почвах не может быть восстановлена даже при применении самых высоких доз минеральных удобрений. Для того чтобы остановить эрозию почвы и более эффективно использовать дождевые осадки и от таяния снега, следует ввести севообороты с учетом защитных и улучшающих почву свойств различных культур, особенно на склонах. Важность структуры почвы и инфильтрационной способности очевидна. Поверхность почвы нуждается в защите от разрушительных дождевых капель и ветра путем совместных посевов и покровных культур для преодоления периода без растительного покрова почвы и поверхностного мульчирования остатками сельскохозяйственных культур. Движение по полям должно быть сокращено, особенно тогда, когда почва влажная. И обработка почвы должна быть минимальной или, что еще лучше, – без обработки. Все эти методы улучшают структуру почвы, что приводит к значительному увеличению инфильтрации, а это, в свою очередь, сокращает деструктивный сток (Bennet, 1947; Дояренко, 1963; Грызлов, 1975; Конке и Бертран, 1962; Russel 1912, 1990, Заславский, 1966, 1979).

Рябов (цитирует Боинчан, 1999) сгруппировал культуры в соответствии с их почвозащитной способностью:

Культуры	Коэффициент риска эрозии по сравнению с черным паром (1.0)
1. Культуры с наибольшей способностью защищать почву от эрозии: многолетние бобовые и смеси бобовых и злаковых трав.	0.01-0.08
2. Зерновые культуры со средней способностью защищать почву от эрозии: озимые зерновые и кормовые культуры.	0.20-0.30
3. Посевы с низкой способностью защищать почву от эрозии: яровые зерновые и однолетние бобовые.	0.40-0.60
4. Посевы с наименьшей способностью защищать почву от эрозии: пропашные культуры.	0.80-1.00

Эти коэффициенты могут применяться для оценки защитной способности севооборота, которая должна быть близка к 0,30–0,35. Чтобы свести к минимуму эрозию почвы, необходимо уменьшить долю пропашных культур, а также размер полей на склонах; должна быть увеличена и площадь под культурами сплошного способа посева (включая многолетние бобовые и зерновые травы). Многолетние культуры не только защищают почву, но и увеличивают массу корней (Заславский, 1979). Каштанов (1983) и Заславский (1979) предложили следующее соотношение между пропашными культурами и культурами сплошного способа посева, в том числе многолетними бобовыми и злаковыми травами, в зависимости от уклона:

до 1° – 3 : 1 (пропашные культуры: культуры сплошного способа посева);

$1-5^\circ$ – 1 : 1;

$5-8^\circ$ – 1 : 3.

Склоны круче 8° должны быть изъяты из активного оборота, засажены деревьями или использованы как луг (пастбище).

Константинов (1987) оценил снижение урожайности для различных культур на склоновых землях с различной степенью эрозии почвы (таблица 5.17): потеря урожайности для пропашных культур намного больше, чем для культур сплошного способа посева, особенно на более крутых склонах.

Таблица 5.17. Снижение урожайности разных культур на склонах с разной степенью эрозии почвы

Культуры	Снижение урожая (%)	
	Средняя степень эрозии почвы	Высокая степень эрозии почвы
Сахарная свекла	60-70	85-90
Подсолнечник	50-60	70-80
Кукуруза на зерно	30-40	75-85
Озимая пшеница	40-50	65-70
Горох	30-40	40-50
Многолетние травы	10-15	25-40

Он также оценил период времени в течение вегетационного периода, когда почва защищена в севооборотах с различным соотношением между пропашными и культурами сплошного способа посева (таблица 5.18). Даже в севооборотах без пропашных культур почва остается непокрытой в течение одной трети вегетационного периода, поэтому севооборот должен дополняться агротехническими мерами по борьбе с эрозией, такими как контурные посевы и залужение водотоков. Во время проливных дождей трудно избежать эрозии почвы даже на относительно ровных почвах.

Таблица 5.18. Продолжительность времени с растительным покровом на поверхности почвы в севооборотах с различными соотношениями между пропашными культурами и культурами сплошного способа посева

Доля сельскохозяйственных культур в севообороте			% вегетационного периода	
Пропашные культуры	Озимые зерновые культуры	Яровые культуры	С растительным покровом	Без растительного покрова
0	60	40	68	32
20	40	40	59	41
40	40	40	59	41
40	40	20	58	42
50	25	25	51	49
60	20	20	49	51
80	0	20	33	67

В степях на черноземах защитные лесополосы имеют неоценимое значение для снижения риска эрозии почвы и засухи – они служат рубашками для полей так же, как рубашки на наших телах во время летнего зноя. Каждая ферма должна иметь полную сеть полезащитных полос. Наилучший интервал между ними можно рассчитать, зная, что защита лесополосой распространяется на расстояние в 20–30 раз выше высоты древесной растительности лесополосы. На склонах с уклоном менее 5°, на тяжелосуглинистом типичном черноземе расстояние между защитными полосами должно быть 400–600 м, тогда как на известковом черноземе или сероземе рекомендуется более близкое расстояние – 350–360 м; поэтому размер поля должен быть 16–36 га в первом случае, но 9–12 га во втором. Ширина защитных полос может составлять от 10 м до 20 м, но высота растений важнее, чем ее ширина. Само собой разумеется, что полосы должны быть ориентированы в направлении господствующего ветра, а выбранные деревья и кустарники должны быть устойчивыми к жаре и засухе.

5.2.5. Повышение природной способности сельскохозяйственных культур и почв подавлять сорняки, вредителей и болезни, предотвращать истощение почвы

Вероятно, наиболее важными аспектами эффективного севооборота являются разнообразие культур и здоровая почва. Они взаимосвязаны, потому что надземное разнообразие стимулирует разнообразие почвенных организмов, что имеет решающее значение для здоровья почвы. Замена биологических функций почвы химическими веществами и механической обработкой почвы наносит ущерб окружающей среде и обществу.

5.2.5.1. Больше разнообразие культур в севооборотах

Биоразнообразие помогает бороться с вредителями и болезнями, нарушая их жизненные циклы и уменьшая доступные для них ресурсы, путем аллелопатического эффекта, общего и специфического подавления почвой, физиологического сопротивления сельскохозяйственных культур и сохранения естественных врагов. Самый надежный способ нарушить жизненные циклы вредителей и патогенных микроорганизмов – это уничтожить их хозяев, но вредители и патогенные микроорганизмы всегда будут возвращаться воздушным путем, поэтому большее разнообразие культур в севообороте должно сочетаться с биоразнообразием на уровне ландшафта (*Karlen and others, 1994; Kremen and Miles, 2012; Krupinsky and others, 2002; Ratnedass and others, 2012; Wezel and others, 2014*). Например, цветущие полосы на полях, которые дают пыльцу и нектар для полезных насекомых (рис. 5.8), сокращают популяции тли. Общая сельскохозяйственная политика Европейского союза предусматривает наличие на не менее 10 процентах площади каждого хозяйства естественной растительности.

Исследования в области биологической борьбы с вредителями и болезнями сосредоточены на идентификации и внедрении отдельных штаммов агентов биологической борьбы (*Alabouvette and others. 2006; Matson and others, 1997*), и часто безуспешно, поскольку полевые условия не соответствуют требованиям высвобождаемых агентов. Исследования по защите сельскохозяйственных культур могли бы быть полезными при их расширении за пределы культур и полей, чтобы рассмотреть взаимодействие между сельскохозяйственными культурами, вредителями и патогенными микроорганизмами, их антагонистами и окружающей средой на уровне хозяйств и ландшафтов.

Двулетние севообороты лучше, чем монокультура, но их потенциал по улучшению урожая и здоровья почвы весьма ограничен. Чем длительнее и разнообразнее севообороты, тем лучше, но существуют исключения: например, после четырех или пяти лет непрерывной озимой пшеницы заражение уменьшается и больше не снижает урожайность (*Powlson and others, 2014*). Ключевой момент в том, чтобы найти оптимальную последовательность культур вместе с надлежащим управлением растительными остатками культур и соблюдать периоды возврата культур на прежние поля, чтобы не накапливать инокулят в почве. Кук (*Cook, (2000)* представляет данные относительного полевого опыта в университете штата Вашингтон, Палус, о реакции озимой пшеницы на фумигацию

почвы. Фумигация подавляла ряд штаммов: *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*, *Rhizoctonia solani* AG8 и *Pythium* spp. (все почвенные патогены) – и урожайность бессменной озимой пшеницы увеличилась на 70 процентов, но только на 22 процента при 2-летнем севообороте с озимой пшеницей и горохом, и только на 7 процентов в 3-летнем севообороте с озимой пшеницей – яровым ячменем – горохом. Таким образом, более длительный интервал между последовательными посевами озимой пшеницы в севообороте эквивалентен фумигации почвы. Вальтер Гольдштейн (*Walter Goldstein*, 1986) обнаружил ту же картину для озимой пшеницы, выращенной после ярового ячменя и многолетних бобовых, но при способности подавлять сорняки. Пшеница после многолетних бобовых культур была значительно лучше, чем после ярового ячменя; фумигация увеличила длину корней озимой пшеницы, посеянной после ярового ячменя, но почти не повлияла на корни пшеницы, выращенной после люцерны.

Эксперименты, проведенные в Канаде, продемонстрировали более значимую способность почв подавлять болезни при 3-летних севооборотах по сравнению с 2-летним циклом (*Peters and others*, 2003). Заражение тканей стебля, столона и клубней картофеля черной гнилью, вызванное *Rhizoctonia solani*, было намного более значительным при 2-летнем севообороте (яровой ячмень – картофель), чем при 3-летнем севообороте (яровой ячмень, чередующийся с красным клевером – красным клевером – картофелем); аналогично, клубни из 2-летнего севооборота были гораздо более заражены сухой гнилью (*Fusarium* spp.), серебряным налетом (*Helminthosporium soloni*) и *Phytophthora erythroseptica*. Подавление болезней объясняется конкуренцией почвенных микробов в корневой зоне, но механизмы плохо изучены. Эффект еще больше, когда остатки сельскохозяйственных культур остаются на поверхности почвы или вблизи нее и когда вносятся другие органические добавки (*Bailey and Lazarovits*, 2003).

Вредители, болезни и сорняки также могут быть подавлены аллелопатическими культурами, которые выделяют вредные соединения во время роста или в результате разложения растительных остатков (*Wezel and others*, 2014). Например, корневые экссудаты ржи, сорго и подсолнечника подавляют прорастание сорняков; крестоцветные, используемые в качестве зеленого удобрения или покровных культур, обладают непрямым аллелопатическим эффектом, сходным с биофумигацией против возбудителей болезней почвы, нематод и сорняков; а севооборот с многолетними бобовыми, злаковыми травами или смесями бобовых и злаковых трав увеличивает способность почв подавлять сорняки, вредителей, включая нематоды, и болезни (*Barker and Koenning*, 1999; *Bender u and others*, 2016).

Использование возможностей саморегулирования сельскохозяйственных культур и почв означает меньшую потребность в индустриальных вложениях (инпутах) для борьбы с сорняками, вредителями и болезнями. Подземное биоразнообразие является ключевым. Мадер и другие (*Mäder and others*, 2000) обнаружили, что в севообороте с высоким разнообразием культур, с многолетними культурами, но без индустриальных вложений (инпуты), доля длины корней, колонизированных арбускулярными микоризами, была на 30–60% больше, чем в почвах с обычным земледелием, вклад N и P удобрений был на 50–70% меньше. Правильное экологическое управление посевами в севообороте включает также

сроки и нормы посева, обработки почвы, питание культур, выбор сортов с более высокой устойчивостью к болезнетворным микроорганизмам, поликультуры и смеси различных сортов. Например, большинство насекомых и грибковых патогенов реагируют на более высокие показатели азотного питания (*Matson and others*, 1997); *Chaboussou* (2004), на которого ссылаются *Ratnedaas* и др. (2012), обнаружил, что культуры с более высоким содержанием аминокислот и моносахаридов более привлекательны для насекомых и патогенных микроорганизмов.

Спорной темой, которая требует целенаправленных исследований, является степень пораженности сорняками, вредителями и болезнями при отсутствии вспашки (*no-till*) в сравнении с традиционной вспашкой; аллелопатия может быть альтернативой химическому контролю (*Farooq and others*, 2010; *Chou*, 2010). Еще одна проблема, требующая дальнейшего изучения, – это влияние аллохимических веществ на всхожесть семян при разложении растительных остатков. Предварительные результаты показывают, что водная вытяжка из сорго и подсолнечника в концентрации 8–16% способствовала повышению уровня подавления тли от 52 до 63 процентов. Фарук и др. (*Farooq and others*, 2010) также сообщают, что 12 л/га водного экстракта сорго вдвое сократило применение гербицида (атразина), необходимого для борьбы с сорняками.

В обзоре литературы по применению севооборотов и совместных посевов для борьбы с сорняками Либман и Дик (*Liebman and Dyck*, 1993) пришли к выводу, что успех севооборота для подавления сорняков зависит от последовательности посевов, аллелопатии и механических нарушений. В идеале, культуры с более высокой способностью подавлять сорняки должны чередоваться с культурами, которые имеют меньшую способность. К культурам с высокой способностью подавлять сорняки относятся озимые зерновые, конопля, многолетние бобовые и травы; культуры со средней способностью конкурировать с сорняками включают: яровой ячмень, овес, подсолнечник и кукурузу; к культурам со слабой способностью относятся яровая пшеница, просо, лен, картофель и сахарная свекла. Хорошие результаты были достигнуты благодаря чередованию озимых зерновых с яровыми культурами, посевов с разными сроками посева, пропашных и сплошного способа посева культур. В степных условиях ранние предшественники для озимых злаков, многолетних бобовых и злаковых трав очищают поля от сорняков (Дояренко, 1963, Ермолов, 1879, Куров, 1916). Хомко и др. (1987) обнаружили, что у озимой пшеницы после гороха, сафлора и других рано убираемых предшественников запас семян сорняков был на 33–43% меньше, чем в бессменных посевах озимой пшеницы или пшеницы, посеянной после кукурузы на силос. *Cardina* и др. (2002) описали размер и состав банка семян сорняков в штате Огайо (*Ohio*) после 35 лет бессменной кукурузы и в севообороте кукуруза – овес – травы при отвальной вспашке, безотвальной обработке почвы и без вспашки (*no-till*); как в Вустере, так и в Хойтвилле банк сорняков был на 40–45 процентов больше в бессменной пшенице, чем в севообороте.

Но севооборот сам по себе не может уничтожить сорняки. Задолго до появления гербицидов Пачоский (1914), ученик Докучаева и сам опытный ботаник, писал, что борьба с сорняками требует целостного подхода. Компонентами системы устойчивого управления поражением сорняками являются:

- севооборот с большим разнообразием основных и промежуточных культур;
- нормы и сроки сева;
- методы, сроки и качество обработки почвы;
- условия и способы внесения удобрений;
- сочетание растениеводства и животноводства в условиях каждого хозяйства;
- механическая борьба с сорняками до и после всходов, а также во время вегетации.

5.2.5.2. Качество почвы

Улучшение здоровья почвы – хороший первый шаг к борьбе с сорняками, вредителями и болезнями. Это включает в себя следующее: предотвращение уплотнения почвы от потерь органического вещества почвы, а также предотвращение чрезмерного передвижения агрегатов по полю, особенно ранней весной, когда почва влажная и несозревшая физически; повышение биологической активности – дождевые черви являются хорошим индикатором здоровья почвы; предотвращение накопления растворимых (доступных) питательных веществ в почве, что способствует усилению конкурентоспособности сорняков. Здоровая почва способствует здоровью культур и здоровью корневой системы, которая может конкурировать с сорняками за воду и питательные вещества. В плодородной почве потери продукции от поражения сорняками незначительны, но на менее плодородных почвах снижение урожайности из-за сорняков более значимо. Конкурентоспособность сельскохозяйственных культур по отношению к сорнякам в течение первой трети вегетационного периода имеет решающее значение; если условия выращивания в этот период неблагоприятны, культуры проигрывают в конкуренции с сорняками.

Очевидно, семена должны быть очищены перед посевом. Профилактика лучше и дешевле, чем «борьба с сорняками», но выбор сортов сельскохозяйственных культур должен учитывать их способность конкурировать с сорняками и быть устойчивыми к основным вредителям и болезням в регионе. Например, сорта озимых зерновых культур с более высокой соломой лучше конкурируют с сорняками, чем сорта карликовые и полукарликовые, но, с другой стороны, они не должны полегать. Смесь многолетних бобовых и злаковых трав способствует конкуренции с сорняками и повышению устойчивости к вредителям и болезням благодаря лучшей почвенной микрофлоре, в частности грибам.

При этом изменение отношения к сорнякам давно назрело. Сорняки являются хорошими показателями качества почвы; есть виды, которые указывают на кислотность почвы, засоленность, уплотнение и т. д. И любое количество сорняков ниже экономического порога не является проблемой; действительно, они могут быть полезны – они накапливают солнечную энергию, производят органические вещества, предотвращают эрозию почвы, смягчают вымывание питательных веществ, служат источником питательной пыли для полезных насекомых и других диких животных.

5.3. Выводы

1. Академик Д. Н. Прянишников выделил четыре причины необходимости соблюдения севооборотов: физические, химические, биологические и экономические. Долгое время считалось, что химические вещества могут заменить физические, химические и биологические преимущества севооборотов. Теперь ясно, что они не могут. Напротив, возросла важность севооборотов, особенно для «борьбы» с вредителями, болезнями, сорняками и аллелопатией, а также для стимулирования биологической фиксации азота и структуры почвы. «Не кладите все яйца в одну корзину» – это все еще хороший совет. Севооборот – самая дешевая и эффективная практика управления, приносящая пользу как урожайности, так и плодородию почвы.
2. Хорошо спроектированные севообороты могут предотвратить многие проблемы, с которыми сегодня сталкивается сельское хозяйство. Принципы, которые должны соблюдаться:
 - большее разнообразие культур во времени и в пространстве в пределах каждого поля и на ландшафтных уровнях;
 - чередование культур с различной глубиной проникновения корневой системы;
 - восстановление плодородия почвы; каждый севооборот должен обеспечить бездефицитный баланс органического вещества почвы или способствовать увеличению содержания органического вещества почвы;
 - предотвращение эрозии почвы и засухи;
 - повышение естественной способности сельскохозяйственных культур подавлять сорняки, вредителей и болезни и избежать истощения почвы.
3. В черноземной степи и прерии крайне важно обеспечить оптимальное размещение культур по предшественникам и соблюдать сроки возврата культур на прежнее поле выращивания в севообороте.
4. Удобрение не может заменить севооборот. Снижение урожайности озимой пшеницы, высеваемой по поздноубираемым предшественникам, по сравнению с раноубираемыми предшественниками, вдвое увеличивает выгоду от применения минеральных удобрений: 1,89 т/га по сравнению с 0,99 т/га (в среднем за 12 лет); бессменная озимая пшеница дает самые низкие урожаи как на неудобренных, так и на удобренных полях.
5. Доля плодородия почвы в формировании урожая озимой пшеницы является самой высокой после раноубираемых предшественников (90%) и самой низкой в условиях бессменной культуры (50%): худшие характеристики почвы в бессменной культуре должны быть смягчены за счет более высоких доз минеральных удобрений и применения пестицидов для борьбы с сорняками, вредителями и болезнями; эффект севооборота (разница между урожайностью в севооборотах и в бессменных посевах) значительно больше для озимой пшеницы и сахарной свеклы по сравнению с кукурузой на зерно и подсолнечником; следовательно, эффект удобрения выше для озимой пшеницы и сахарной свеклы и ниже для кукурузы на зерно и подсолнечника.

6. Эффективность использования азота и эффективность использования воды значительно выше в севообороте, чем в бессменных посевах.
7. Увеличение частоты и суровости засухи увеличивает значимость запасов воды в более глубоких слоях почвы и усиливает ценность культур с глубокими и обильными корневыми системами, такими как люцерна. Но культуры с глубокими корнями и более длительным вегетационным периодом высушивают почву больше, чем культуры с поверхностными корнями и коротким вегетационным периодом, поэтому в севообороте интервал между культурами с глубокопроникающей корневой системой должен составлять не менее двух лет, чтобы можно было пополнять запас почвенной воды в подпочве.
8. Черный пар неэффективен в накоплении дождевой и талой воды.
9. Культуры отличаются по своей защитной способности от эрозии, черный пар обладает наименьшей почвозащитной способностью. Соотношение между культурами сплошного посева и пропашными культурами следует определять в зависимости от крутизны склонов на уровне ландшафта.
10. Большее пространственное и временное разнообразие сельскохозяйственных культур в севообороте может и должно стать основой более устойчивых систем земледелия. Экономические и социальные выгоды от соблюдения севооборотов очевидны: меньшая зависимость от минеральных удобрений и пестицидов; меньшая необходимость в механической обработке почвы – намного меньший расход топлива; большая инфильтрация и способность удерживать почвенную влагу; повышенная устойчивость к эрозии почвы; улучшение общественного здоровья; и более сильные сельские общины. Разве этого недостаточно?

*Я никогда не получал ни копейки государственных денег. Мои руки чисты. –
Коке Норфолк (Coke of Norfolk)*

Список литературы

- Alabouvette C, C Olivain & C Steinberg 2006 Biological control of plant diseases: the European situation. *European Journal of Plant Pathology* 114, 3, 329-341
- Bailey KL & G Lazarovits 2003 Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil and Tillage Research* 72, 2, 169-180
- Barker KR & SR Koenning 1998 Developing sustainable systems for nematode management. *Annual Review of Phytopathology* 36, 165-205
- Bender SFA, C Wagg & MGA van Heijden 2016 An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology and Evolution* 31, 6, 440-452
- Bennet HH 1947 *Elements of soil conservation*. McGraw Hill, New York
- Bierderbeck VO, HH Janzen, CA Campbell & RP Zentner 1994 Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biology and Biochemistry* 26, 12, 1647-1656
- Boincean BP 2014. Fifty years of field experiments with crop rotations and continuous cultures at the Selectia Research Institute for Field Crops. 175-200 in DL Dent (editor) *Soil as World Heritage*. Springer, Dordrecht
- Broadberry S, BMS Campbell, M Overton and others 2009 *Historical national accounts for Britain 1300-1850: some preliminary estimates*. <http://warwick.ac.uk/fac/soc/economics/staff/sbroadberry/wp/britishgdplongrun.pdf>
- Bullock DG 1992 Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences* 11, 4, 308-326

- Campbell CA, VO Biederbeck, BP Zentner & GP Lafond 1991 Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science* 71, 363-376
- Campbell CA, SA Brand, VO Biederbeck and others 1992 Effect of crop rotations and rotation phase on characteristics of soil organic matter in a Dark Brown Chernozemic soil. *Canadian Journal of Soil Science* 72, 403-416
- Campbell CA, RJK Myers & D Curtin 1995 Managing nitrogen for sustainable crop production. *Fertilizer Research* 42, 277-296
- Cardina J, CP Herms & DJ Doohan 2002 Crop rotation and tillage system effects on weed seed banks. *Weed Science* 50, 4, 448-460
- Chatterton L & B Chatterton 1996 *Sustainable dryland farming. Farmer innovation in a Mediterranean climate*. Cambridge University Press
- Chou C-H 2010 Roles of allelopathy in plant biodiversity and sustainable agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences* 18, 5 609-636
- Constantinov IS 1987 *Soil erosion protection for intensive agriculture*. Stiinta, Chisinau (Russian)
- Cook RJ 2000 Advances in plant health management in the twentieth century. *Annual Review of Phytopathology* 38, 95-116
- Cresswell HP & JA Kirkegaard 1995 Subsoil amelioration by plant roots- the process and the evidence. *Australian Journal of Soil Research* 33, 221-239
- Crews TE & MB Peoples 2004 Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture Ecosystems and Environment* 102, 279-297
- Crews TE & MB Peoples 2005 Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems* 72, 101-120
- Crews TE, J Blesh, SW Culman and others 2016 Going where no grains have gone before: from early to mid-succession. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 223, 223-238
- Dent 2019 Green water, used by plants and managed by farmers: measurement, accounting, policy. 29-44 in JA Allan, M Keulertz, AJ Colman & B Bromwich (editors) *The Oxford handbook of water, food and society*. Oxford University Press, New York
- Drinkwater LE, P Wagoner & M Sarrantonio 1998 Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Letters to Nature* 396, 262-265
- FAO 2017 *The future of food and agriculture. Trends and challenges. Summary*. Rome
- Farooq M, K Jabron, ZA Cheema and others 2010 The role of allelopathy in agricultural pest management. *Agricultural Pest Management* 67, 493-506
- Franzluebbers AJ, J Sawchik & MA Taboada 2014 Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190, 18-26
- Franke AC, GJ van den Brand, B Vanlauwe & KE Giller. 2018 Sustainable intensification through rotation with grain legumes in sub-Saharan Africa. A review. *Agriculture Ecosystems and Environment* 261, 172-185
- Fustec J, F Lesuffleur, S Mathieu & JB Cliquet 2010 Nitrogen rhizo-deposition of legumes. A review. *INRA Agronomy for Sustainable Development* 30, 1, 57-66
- Giller KE & G Cadisch 1995 Future benefits from biological nitrogen fixation: an ecological approach to agriculture. *Plant and Soil* 174, 1-2, 255-277
- Gliessman SR 2000 *Agroecosystem sustainability. Developing practical strategies*. CRC Press, Boca Raton FL
- Goldstein W 1999 *Alternative crop-rotation and management systems for the Palouse*. PhD thesis, Washington State University, Dept of Agronomy and Soils, Pullman WA
- Goulding K 2000 Nitrate leaching from arable and horticultural land. *Soil Use and Management* 16, 145-151
- Gregorich EC, CF Drury & JA Beldock 2001 Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation. *Canadian Journal of Soil Science* 81, 21-31
- Halvorson AD, CA Ruele & RT Follett 1999 Nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen in a dryland cropping system. *Soil Science Society of America Journal* 63, 4, 912-917

- Haynes RJ, RS Swift & RC Stephen 1991 Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil and Tillage Research* 19, 77-87
- Hughes HD 1925 The future of sweet clover in the corn belt. *Journal of American Society of Agronomy* 17, 7, 409-417
- Jensen ES, MB Peoples, RM Boddey and others 2012 Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agronomy and Sustainable Development* 32, 329-364
- Johnson TC 1927 Crop rotation in relation to soil productivity. *Journal of the American Society of Agronomy* 19, 518-527
- Karlen DL, EG Hurley, SA Andrew and others 2006 Crop rotation effects on soil quality at three Northern corn/soybean Belt Locations. *Agronomy Journal* 98, 484-495
- Karlen DL, DG Varvel, DG Bullock & RM Cruse 1994 Crop rotations for the 21st century. *Advances in Agronomy* 53, 3-45
- Kessel C van & C Hartley 2000 Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crops Research* 65, 165-181
- Kremen C & A Miles 2012 Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities and trade-offs. *Ecology and Society* 17, 4, 40
- Krupinsky JM, KL Bailey, MP McMullen and others 2002 Managing plant disease risk in diversified cropping systems. *Agronomy Journal* 94, 4, 198-209
- Lenssen AW, JT Waddell, GD Johnson & GR Carlson 2007 Diversified cropping systems in semiarid Montana: nitrogen use during drought. *Soil and Tillage Research* 94, 362-375
- Liebman M & E Dyck 1993 Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications* 3, 1, 92-122
- Lin R & C Chen 2014 Tillage, crop rotation, and nitrogen management strategies for wheat in Central Montana. *Agronomy Journal* 106, 475-485
- Malitev TS 1983 *Thoughts about yields. Vol. 1.* South-Ural Book Publishers, Celjabinsk (Russian)
- Matson PA, WJ Parton, AG Power & MJ Swift 1997 Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277, 504-509
- Mäder P, S Edenhofer, T Boller and others 2000 Arbuscular mycorrhiza in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high input conventional farming systems in a crop rotation. *Biological Fertility of Soils* 31, 2, 150-156
- Mulvaney RL, SA Khan, RG Hoef & HM Brown 2001 A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1164-1172
- Nemecek T, J-S von Richthofen, G Dubois and others 2008 Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy* 28, 380-393
- Oakley RA 1925 The economics of increased legume production (Symposium on the legume problem). *Journal of the American Society of Agronomy* 17, 7, 389-394
- O'Dea JK, CA Jones, CA Zabinski and others 2015 Legume, cropping intensity, and N-fertilization effects on soil attributes and processes from an eight-year-old semiarid wheat system. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems* 102, 2, 179-194
- Peoples MB, J Brockwell, DF Herridge and others 2009 The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. Review article. *Symbiosis* 48, 1-17
- Peters RD, AV Sturz, MR Carter & JB Sanderson 2003 Developing disease-suppressive soils through crop rotation and tillage management practices. *Soil and Tillage Research* 72, 181-192
- Powlson DS, AJ MacDonald & PR Poulton 2014 The continuing value of long-term field experiments. Insights for achieving food security and environmental integrity. 131-158 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht.
- Power JF 1990 Fertility management and nutrient cycling. *Advances in Soil Science* 13, 131-149
- Ratneda A, P Fernandes, J Avelino & R Habib 2012 Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agro-ecosystems: a review. *Agronomy and Sustainable Development* 32, 1, 273-303.
- Renard KG, GR Foster, GA Weesies and others 1997 *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation*. Agriculture Handbook 703, US Dept Agriculture, Washington DC.

- Ridley AM, B Christy, FX Dunin, and others 2001 Lucerne in crop rotations on the Riverine Plains. 1. The Soil Water Balance. *Australian Journal of Agricultural Research* 52, 263-277
- Rotmistrov VG 1913 Crop rotation in relation to soil productivity. *Journal of the American Society of Agronomy* 19, 518-527
- Russel Sir EJ. 1912 *Soil conditions and crop growth*. Monographs in Biochemistry. Longmans Green and Co., London
- Russel EW 1950 *Soil conditions and crop growth, 8th edition*. Longman (Russian translation 1955)
- Soon LK, SA Brand & SS Malhi 2006 Nitrogen supply of a Dark brown chernozem soil and its utilization by wheat. *Canadian Journal of Soil Science* 86, 483-491
- Stadnic SS & BP Boincean 2017. Economic efficiency of fertilization for different crops in the crop rotation. 17-22 in *Sustainable agriculture of Moldova: modern challenges and perspectives*. Indigo Colour, Bălți (Romanian)
- Stirling Lady AMW 1912 *Coke of Norfolk and his friends*. John Lane The Bodley Head, London
- Turner NC 2004 Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. *Journal of Experimental Botany* 55, 407, 2413-2425
- Wezel A, M Casagrande, F Celette and others 2014 Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 1, 1-20
- Wischmeier WH & DD Smith 1965 *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation*. Handbook 282. Re-issued 1978 as *Predicting rainfall erosion losses: guide to conservation planning*. Handbook 537 US Dept Agriculture, Washington DC.
- Боинчан Б.П. Экологическое земледелие в Республике Молдова (Севообороты и органическое вещество). Кишинев: Штиинца, 1999. 299 с.
- Вильямс В.Р. Избранные труды, тома 5-10. М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. 1950-1952.
- Грызлов Е.Б. Почвозащитная система земледелия. Ростов-на-Дону: Ростовское книжное издательство, 1975. 136 с.
- Дояренко, А.Г. Избранные сочинения. М.: Сельхозиздат, 1963. 495 с.
- Заславский М.Н. Эрозия почв и земледелие на склонах. Кишинев: Картя молдовеняскэ. 1966. 494 с.
- Заславский М.Н. Эрозия почв. М.: Мысль, 1979. 246 с.
- Захарченко И.Г. Водный режим почвы в севообороте с зерновыми культурами и сахарной свеклой. //Почвоведение №3, 1960, с.34-42.
- Ермолов А.С. Организация полевого хозяйства. Севооборот II. Санкт- Петербург: Изд. А.Ф. Девриен, 1879.
- Каштанов А. Н. Научные основы почвенного и водозащитного земледелия на склонах. //: Почвозащитное земледелие на склонах. М. 1983, с. 9-22.
- Конке Г., Бертран А. Защита почвы. Русский перевод С.С. Соболева. М.: Сельхозиздат, 1962. 210 с.
- Куров П. Как получить высокие урожаи озимых зерновых культур в Бессарабии. Бессарабский департамент сельского хозяйства, Кишинев, 1916.
- Лекута Э. Основы улучшающего землю хозяйства, 4-е издание. Перевод с французского. Санкт-Петербург, 1889 г.
- Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н. Органическое вещество пахотных нечерноземных почв. М.: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2004. 630 с.
- Пачоский И.К. Очерк растительности Бессарабии. Кишинев, 1914. 51 с.
- Прянишников Д. Н. Азот в растениеводстве и в земледелии. Избранные труды. Вып. II. М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1953.
- Родионовский Ф.К. Водный режим почвы под отдельными культурами полевого севооборота. // Почвоведение. 1959. №12. с. 91-98.
- Хомко В.Г., Л.С. Хомко и З.А. Орлова. Обзор исследований по севообороту в Ставропольском крае. // Агрономические основы специализации севооборота. М.: Агропромиздат. 1987. с.154-162.

ОБРАБОТКА ПОЧВЫ И КОНСЕРВАТИВНАЯ СИСТЕМА ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Я был полем почти тысячу лет, и я знаю мужчин. Некоторые умные, некоторые добрые, но очень немногие умные и добрые. Но он был такой. И мне жаль, что всем остальным полям в Англии, кому он так нужен в эти дни, придется обходиться без него.

Рональд Блит: некролог для суффольского фермера, 1930
(Ronald Blyth: Obituary for a Suffolk farmer, 1930)

Аннотация. Вопрос об обработке почвы противоречивый, но из поколения в поколение споров не было: фермеры пахали так, как пахали их предки, только более тщательно. Плюсы вспашки: сорняки и вредители контролируются путем нарушения их жизненного цикла – это кратко; вспашка разбивает корковую поверхность и уплотненный верхний слой почвы – кратко; создает семенное ложе и высвобождает питательные вещества для растений путем минерализации почвенного органического вещества – это также может быть и недостатком. Минусы: удаление поверхностного покрова и потеря структуры почвы делают почву уязвимой для эрозии; среда обитания и жизненные циклы дождевых червей, микоризы и множество других полезных почвенных организмов нарушаются; уплотняется плужная подошва и создается препятствие дренажу и притоку воды; это дорого по затратам топлива и рабочей силы. На типичном черноземе Бельцкой степи многолетние полевые испытания различных видов обработки почвы, исключая нулевую обработку почвы, не выявили различий в запасах воды в почве весной, объемной массе почвы или урожайности культур; но потеря органического вещества в почве была в 1,6 раза больше при отвальной вспашке по сравнению с дискованием.

После Пыльной бури в США в 1930-х годах были разработаны меры по контролю эрозионных стоков: контурные террасы, задернение водных стоков и тому подобное. Они никогда не были популярны, потому что первоначальная стоимость и постоянное их обслуживание не окупаются. Кроме того, они не устраняют первопричину, они позволяют вести дела как обычно, но когда нарушаются террасы, результат оказывается хуже, чем было раньше. Основная цель вспашки – уничтожать сорняки; появление тотальных гербицидов сделало нулевую обработку почвы жизнеспособным предложением, и начиная с 1960-х годов фермеры применяли ее на более чем 12% посевных площадей мира. Она предполагает контроль за эрозией почвы, упрощенные технологические операции, снижение затрат на механизированные работы, больше дней на посев, большую устойчивость к засухе,

как правило, более высокие урожаи и, что не менее важно, сокращение затрат человеко-часов почти на 70%.

Основываясь на опыте этих фермеров, консервативное земледелие (КЗ) или почвозащитное сельское хозяйство включает в себя: отсутствие механического нарушения почвы; постоянный почвенный покров растениями или растительными остатками; диверсификацию культур в севооборотах или ассоциаций культур, которые контролируют сорняки, вредителей и болезни. Новая парадигма работает почти везде по той простой причине, что она устраняет деструктивное нарушение почвы и ежедневное воздействие солнца, ветра и дождя. Но первый закон КЗ, часто игнорируемый, состоит в том, чтобы снять все физические и химические ограничения перед принятием *no-till*; уплотненный слой плужной подошвы должен быть разбит глубокой обработкой почвы. Сохранение растительных остатков защищает поверхность и питает жизнь в почве, которая, имея хотя бы половину шансов, становится самоподдерживающейся; почвенный покров в 70% случаев обычно устраняет эрозию почвы. Севообороты должны включать многолетние травы и бобовые культуры для адекватного производства биомассы и биологической фиксации азота. Чрезмерное использование пестицидов при нулевой обработке почвы является мифом – фермеры КЗ используют все меньше и меньше химикатов, чем обычные фермеры; но предосторожность требует альтернативы. Переход на КЗ – сложный процесс. Он требует переходного периода для улучшения качества почвы, чтобы дать возможность перенастроить жизнь почвы, а фермеру – научиться управлять новой системой.

Ключевые слова: за и против обработки почвы, нулевая обработка почвы/без обработки почвы, консервативное земледелие, использование пестицидов, качество почвы, переход к консервативному земледелию.

6.1. Введение

В последние годы большие споры велись о том, пахать или не пахать, но из поколения в поколение споров не было: фермеры пахали так, как пахали их предки – только более тщательно. Фермеры пашут, чтобы уничтожить сорняки, подготовить семенное ложе и мобилизовать почвенные питательные вещества. Но это разрушительно. Вспашка может только разрезать, смешивать и переворачивать верхний слой почвы; это ничего не добавляет. В условиях естественной растительности поверхностная мульча из войлочных растительных остатков совместно с растительностью поглощают взрывную силу капель дождя и способствуют инфильтрации воды от дождей и таяния снега и постепенному отводу избыточной воды в ручьи и водоносные горизонты. Расчистка естественной растительности, уборка сельскохозяйственных культур и растительных остатков, обнажение поверхности почвы для стихийных сил природы и обработка почвы, которая переворачивает верхний слой почвы вверх дном и сжигает гумус – все это приводит к уплотнению, заболачиванию, образованию поверхностной корки, потере биоразнообразия и, рано или поздно, все это приведет к эрозии самой почвы. Это означает падение урожайности, потерю средств к существованию и экологических услуг и в

конечном итоге, отказ от земли. Внешние факторы включают наводнения, эрозию почвы, сброс осадков в ручьи и водохранилища и избыток питательных веществ в ручьях, озерах и подземных водах.

После катастрофических пыльных бурь на Великих равнинах североамериканского континента в 1930-х годах, вошедших в историю как Пыльный котел, были разработаны меры по сохранению почвы, в основном для контроля разрушительного стока воды: террасы, контурные посевы, задернение водных путей и тому подобное. Эти механические меры никогда не были популярны, потому что их первоначальная стоимость и постоянное обслуживание не окупаются. Кроме того, они не решают коренные причины эрозии; они просто позволяют фермерам вести обычную жизнь на террасах или между ними. Структура почвы и ее проницаемость продолжают ухудшаться, сток воды все еще происходит, и, когда террасы нарушены, результат оказывается хуже, чем прежде.

В книге «Безумие пахаря», опубликованной в 1943 году Эдвардом Фолкнером (*Edward Faulkner, Plowman's Folly*), утверждается, что отвальный плуг нанес человечеству больший ущерб, чем все войны вместе взятые. Фолкнер сделал безотвальную вспашку почвы реальной. Разработка тотальных гербицидов (паракват в 1961 году, глифосат через десять лет) сделала возможным нулевую обработку почвы, и вскоре она получила признание, особенно в США. Но для фермеров на юге Бразилии, страдающих в то время от разрушительной эрозии почвы, принятие нулевой обработки почвы было вопросом выживания. Такая технология предлагала контроль за эрозией почвы, более простые в управлении технологические операции, сокращение затрат на оборудование, увеличение продолжительности посевов, повышение устойчивости к засухе, как правило, более высокую урожайность и сокращение на 70% затрат человеко-часов, что высвободило время для других видов деятельности. Всего за год, при новом режиме, защитное покрытие и структура почвы улучшились, эрозия прекратилась, рентабельность фермерских хозяйств повысилась, улучшились также водоснабжение и качество воды для местных сообществ.

Практическая поддержка была оказана ассоциациями фермеров, такими как Ассоциация по нулевой обработке почвы тропиков (Бразилия) и по оказанию взаимной помощи в клубах Амигос-де-Терра. По сей день консервативное земледелие (КС) по сути является движением фермеров. Каждый практикующий фермер становился исследователем и евангелистом. Их пионерский опыт был обобщен Джоном Ландерсом (*Landers J.N.*, 1994) и изложен в рекомендациях по: (1) исправлению серьезных ограничений – особенно необходимость разрушения плужной подошвы, чтобы обеспечить возможность инфильтрации и хранения дождевой воды, что предотвращает дальнейшее нарушение почвы при ее обработке; (2) сохранение растительных остатков (в отличие от их сжигания), чтобы обеспечить проницаемый буфер против дождевых капель, а также энергию и питательные вещества для живых организмов, которые создают пористую почву; и (3) прямой посев в мульчу для обеспечения минимального нарушения поверхностного покрова и почвы под ним. Нулевая обработка почвы немыслима без других компонентов системы КС. Помимо отказа от плуга, ключевыми компонентами являются надлежащий менеджмент растительных остатков и покровных культур, а также оптимальный севооборот для контроля сорняков, вредителей и болезней.

Все больше и больше фермеров принимают КС. В 1973/74 годах эта система была применена на площади в 2,8 миллиона гектаров по всему миру; к 2004 году –

уже более 72 млн га; а в течение последнего десятилетия нынешнего столетия усилиями крупных и мелких фермеров эта площадь увеличивалась в среднем на 10,5 млн га ежегодно. Последние глобальные данные (Kassam и др., 2017) показывают, что КС практикуется на площади около 180 млн га. Это составляет 12,5% мировых пахотных земель, в Северной Америке эта доля составляет более 35%, более 40% – в Южной Америке, а в Австралии – 75%, по сравнению с 36% в 2013 г.

6.2. Пахать или не пахать?

Споры по поводу методов обработки почвы ведутся со времен Вергилия (29 г. до нашей эры) и, конечно, они велись задолго до того. Основоположник почвозащитной системы земледелия И. Е. Овсинский более двадцати лет изучал способы земледелия на Дальнем Востоке, в Бессарабии, в Подольской губернии. Результаты своих наблюдений и исследований он изложил в книге «Новая система земледелия» (Овсинский, 1909), в которой активно выступает за обработку почвы не глубже 5 см. В то же время, там же, в Бессарабии (ныне – Республика Молдова), через реку Днестр, на Плотнянской сельскохозяйственной опытной станции (с. Плоть, Рыбницкий район), П. П. Трубецкой внедрял и отстаивал метод глубокой вспашки с помощью отвального плуга (Трубецкой, 1913). Подобные противоречивые мнения можно найти повсеместно. Когда в разное время и по отдельности В. В. Докучаев (1883, 1892), П. А. Костычев (1922) и А. А. Измаильский (1937) исследовали чернозем в России, Украине и Молдавии, они сошлись во мнении, что потеря защитного слоя растительных остатков с поверхности почвы приводит к потере структуры и способности почвы поглощать дождевые осадки и талые воды. Вспашка была одобрена только в сочетании с другими компонентами системы земледелия – севооборотами, которые включали многолетние культуры, с внесением навоза. Но после Второй мировой войны плуг стал частью комплекса мер по интенсификации сельского хозяйства – наряду с минеральными удобрениями, пестицидами и ирригацией. Его роль возросла за счет применения все более и более мощной техники для работы на все более увеличивающихся полях и при коротких севооборотах, направленных на получение прибыли, невзирая ни на что.

Недостатки этого упрощенного подхода теперь очевидны, но по ряду причин дискуссия «пахать или не пахать» не продуктивна. Во-первых, обработка почвы ничего не добавляет в почву. Агроном и почвовед А. В. Советов разделил все виды сельскохозяйственных работ на две группы – технологические и материальные, затратные (Советов, 1867). Обработка почвы – технологическая мера, потому что она может только смешивать и перераспределять содержимое почвы. Растительные остатки, навоз и удобрения являются материальными, потому что они действительно что-то добавляют; их влияние зависит от достигнутого уровня плодородия почвы. Обработка почвы также может улучшить состояние почвы – но только на короткое время. Она может мобилизовать питательные вещества и даже увеличить урожайность, но она снижает плодородие почвы, как мы убедились, превращая плодородную девственную степь в истощенную почву (Соколовский, 1956). Ускоряя разложение органического вещества почвы, обработка разрушает устойчивость почвенных агрегатов, делая почву уязвимой для эрозии. Отвал плуга, который выворачивает борозду, не может быть приравнен к другим видам

обработки почвы, которые этого не делают. Различные орудия выполняют разные операции: срезание сорняков, рыхление и перемешивание почвы или уплотнение ее, выравнивание поверхности или создание гребней и углублений, или удержание соломы на поверхности почвы после уборки урожая (Лыков и др, 1982, 1990; Сидоров и Зезюков 1992; Сидоров и другие, 2006). Преимущества и недостатки различных агроприемов могут быть продемонстрированы с помощью однофакторных экспериментов. Плуг с отвалом разрезает и заделывает сорняки, чтобы обеспечить лучший контроль над сорняками, вредителями и болезнями; многие фермеры предпочитают его для этой цели, но поражение сорняками, вредителями и болезнями является следствием недостатков в системе земледелия – особенно в том, что не соблюдаются правильное чередование сельскохозяйственных культур и сбалансированная система удобрения почвы.

В истории сельского хозяйства известны многочисленные случаи, когда один компонент системы земледелия предпочитался другим без сохранения баланса между вносимой и выносимой энергией. В любой ситуации будут сорняки, вредители и появятся другие проблемы, требующие внимания. Например, в СССР в 1960-х годах была развита безотвальная обработка без перевертывания борозды, следуя идеям Терентия Мальцева, которые противоречили учению Вильямса об уникальной способности многолетних культур восстанавливать плодородие почвы. Мальцев утверждал, что при минимальной обработке почвы, которая не разрушает верхний слой почвы, даже однолетние культуры могут восстановить плодородие почвы (Мальцев, 1983). Полтавская область Украины следовала по пути Мальцева, но после сильного засорения полей сорняками была восстановлена вспашка, а затем, в противоположность минимальной обработке почвы, наряду с высокими дозами минеральных удобрений и пестицидов, ввела практику упрощенных севооборотов, или бессменных посевов, без адекватных мер по восстановлению плодородия почвы. Люди все еще живут с последствиями этих мер.

Противоречивые данные о влиянии обработки почвы на плодородие почвы и урожайность не удивительны. По образному выражению А. А. Измаильского, один размер сапог не подойдет всем, потому что у людей разные ноги. Так же обстоит дело с разными почвами, системами посева и погодой, даже на одной ферме: ни одна система обработки почвы не подходит для всех условий. Противоречия в экспериментальных данных по обработке почвы связаны с преимуществами и недостатками отвального плуга, других видов обработки почвы и нулевой обработки.

Преимущества своевременного проведения отвальной вспашки:

- сорняки, вредители и болезни контролируются путем нарушения их жизненного цикла, но ненадолго;
- создается семенное ложе для равномерного прорастания и роста сельскохозяйственных культур;
- увеличивается контакт минеральной части почвы с разлагающимся органическим материалом для лучшего увлажнения и высвобождения питательных веществ для растений; это также может быть и недостатком (Голдштейн и Боинчан, 2000; Triplett and Dick, 2008);
- происходит более быстрое прогревание почвы весной;
- происходит разрыв поверхностного и подпочвенных слоев почвы для улучшения инфильтрации, но на непродолжительный период времени.

Недостатки использования отвального плуга:

- отмечается высокое потребление топлива и труда;
- почва подвергается эрозии из-за удаления защитных растительных остатков и потери структуры почвы;
- нарушается среда обитания и жизненный цикл дождевых червей и множества других полезных видов;
- нарушается дренаж и восходящий поток почвенной воды;
- уплотняется плужная подошва;
- усиливается высыхание верхнего слоя почвы, особенно в засушливые годы.

В 1977 году был заложен длительный полевой опыт на *типичном черноземе* в НИИПК *Selectia* в Бельцах, чтобы выяснить влияние различных методов, глубины и частоты проведения отвальной обработки почвы за ротацию севооборота (Киба-сов, 1982). Обобщенные данные по трем полным ротациям севооборота были опубликованы *Boaghi* и *Bulat* (2014). Не было выявлено никакой разницы в объемной массе почвы или в весенних запасах почвенной влаги, но ежегодные потери ОВП были в 1,6 раза больше под отвальным плугом по сравнению с безотвальной обработкой почвы (таблицы 6.1–6.3); однако нулевая обработка почвы не применялась.

Таблица 6.1. Объемная масса почвы (г/см³) при различных способах обработки почвы в семипольном севообороте

Слой почвы (см)	1 ^я ротация		2 ^я ротация		3 ^я ротация		За-лежь с 1991
	Отваль-ная вспашка	Без-отвальная вспашка	Отваль-ная вспашка	Без-отвальная вспашка	Отваль-ная вспашка	Без-отвальная вспашка	
0-20	1.12	1.16	1.15	1.17	1.16	1.22	1.24
20-40	1.20	1.22	1.23	1.23	1.22	1.25	1.29

Таблица 6.2. Весенние запасы доступной почвенной влаги (мм) в слое почвы 0-200 см при различных способах основной обработки почвы в севообороте

Полные ротации се-вооборота	Вика и овес на зеленую массу		Озимая пше-ница		Сахар-ная свекла		Куку-руза на зерно		Куку-руза на зерно		Яровой ячмень		Подсол-нечник	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1 ^я (1977-1983)	329	315	376	357	349	350	331	327	338	339	365	369	376	360
2 ^я (1984-1990)	317	312	326	325	328	338	280	268	307	316	310	300	327	320
3 ^я (1991-1995)	324	326	344	350	317	321	273	263	338	318	332	340	337	320

1 – отвальная вспашка; 2 – безотвальная обработка почвы.

Таблица 6.3. Запасы органического вещества почвы (ОВП) в слое почвы 0-30 см при различных способах основной обработки почвы в севообороте, т/га

Слой почвы (см)	Отвальная вспашка		Безотвальная вспашка		Общие потери ОВП		Годовые потери ОВП (кг/га)	
	1977	1990	1977	1990	Отвальная вспашка	Безотвальная вспашка	Отвальная вспашка	Безотвальная вспашка
0-30	161.7	159.4	167.5	166.0	-2.3	-1.4	177.0	108.0

Таблица 6.4. Урожайность культур в севообороте при различных способах обработки почвы, среднее за 18 лет (1977-1995 гг.)

Культуры в севообороте	Урожайность (т/га)	
	Отвальная вспашка	Безотвальная обработка почвы
1. Вика и овес на зеленую массу	27.8	28.40
2. Озимая пшеница	4.91	4.97
3. Сахарная свекла	45.0	43.6 (1984-95)
4. Кукуруза на зерно	6.23	6.25
5. Кукуруза на зерно	6.57	6.27
6. Яровой ячмень	4.30	4.34
7. Подсолнечник	2.52	2.48

Различий в урожайности для разных культур в севообороте при разных способах, глубине и периодичности обработки почвы не обнаружено (таблица 6.4). Будем ли мы пахать только один раз в севообороте или каждый год, урожайность будет одинаковой, но отвалный плуг приводит к большим потерям ОВП, а разница в затратах на топливо и рабочую силу склоняется в пользу беспахотной или минимальной обработки почвы. Итак, зачем пахать на черноземе?

В этом эксперименте отсутствовал неудобренный контроль, поэтому было невозможно разделить воздействие обработки почвы и плодородия почвы на урожайность. В 1995 году был начат новый многофакторный полевой опыт, чтобы выяснить действие и взаимодействие между чередованием культур, обработкой почвы и удобрениями. В нем были два севооборота с семью полями, один – со смесью люцерны и райграса, другой – без нее; две системы обработки почвы – безотвальная обработка и обработка почвы отвальным плугом, чередующаяся с безотвальной обработкой почвы; три варианта удобрения: 1) контроль, без удобрений; 2) 10 т/га навоза; 3) 10 т/га навоза + минеральные удобрения (НРК). Нормы минеральных удобрений составляли: N – 12,8; P – 21,8; K – 24,2 кг действующего вещества на/га в севообороте, который включает смесь люцерны и

райграса; N – 38,6; P – 24,2; K – 24,2 кг действующего вещества/га – в другом севообороте без трав. Химические вещества не применялись для контроля за сорняками, вредителями и болезнями. Эксперимент включал три повторности. Размер каждой делянки составил 264 м². Урожайность одного и того же звена в каждом из двух севооборотов для трех полных циклов каждого севооборота представлена в таблице 6.5.

Чередование культур и удобрения оказывают наибольшее влияние на урожайность: в каждом случае урожай культур в севообороте, включающем смесь люцерны и райграса, был выше, чем при отсутствии многолетних трав. Независимо от обработки почвы наибольший дополнительный урожай на удобренных делянках приходился на озимую пшеницу, посеянную после смеси люцерны – райграса на третий год после первого урожая: 1,50–1,55 т/га или на 53–54% относительно озимой пшеницы, посеянной после кукурузы на силос. Сахарная свекла в звене севооборота с люцерной и райграсом на делянках с отвальной вспашкой дала 6,7 т/га (25%), а при безотвальной обработке почвы этот показатель составил 0,9 т/га (3%). Низкая урожайность при безотвальной обработке почвы была вызвана большей засоренностью посевов. Урожайность кукурузы увеличилась на 0,36–0,38 т/га (8%) по сравнению с севооборотом без смеси люцерны и райграса, независимо от системы обработки почвы.

Эффективность систем внесения удобрений (навоз и навоз + NPK) определялась в основном чередованием культур в севообороте. Дополнительные урожаи на делянках, удобренных навозом в севообороте с люцерной и райграсом, по сравнению с севооборотом без люцерны и райграса, составили: для озимой пшеницы – 1,14–1,19 т/га (35–37%), сахарной свеклы – 2,5–2,7 т/га (7–8%) и кукурузы на зерно – 0,15–0,29 т/га (3–6%) независимо от системы обработки почвы. Дополнительные урожаи на делянках, удобренных навозом + NPK, относительно севооборота без люцерны в смеси с райграсом составили: озимая пшеница – 0,39–0,41 т/га (9–10%), сахарная свекла – от –0,9 до +1,3 т/га (от –2 до +4%) и для кукурузы на зерно – 0,25–0,27 т/га (5–6%) независимо от системы обработки почвы. Очевидно, что внесение удобрений, особенно использование навоза + NPK, снижает пользу смеси люцерны с райграсом в севообороте в случае озимой пшеницы, а также сахарной свеклы, но не в случае кукурузы на зерно.

Сравнение эффективности применения навоза + NPK с одним только навозом свидетельствует о следующем: в севообороте без смеси многолетних бобовых и злаковых трав дополнительные урожаи озимой пшеницы на делянках, удобренных навозом + NPK, по сравнению с делянками, получившими только навоз, составили 1,25–1,34 т/га (44–48%) по сравнению с 0,45–0,41 т/га (16–15%) независимо от системы обработки почвы.

Благодаря включению многолетних бобовых и злаковых трав в севооборот, прибавка урожая на делянках, удобренных навозом + NPK, по сравнению с делянками, удобренными только навозом, составила 0,11–0,23 т/га (3–5%) относительно 0,04–0,10 т/га (1–2%) независимо от системы обработки почвы. Включение многолетних бобовых и злаковых трав в севооборот компенсирует любую выгоду от добавления минеральных удобрений к навозу, поэтому для озимой пшеницы, посеянной после смеси бобовых и злаковых трав в севообороте, дополнительное использование минеральных удобрений расточительно. То же самое верно и для

Таблица 6.5. Урожайность сельскохозяйственных культур в севообороте с многолетними бобовыми и злаковыми травами и без них при различных системах обработки почвы и удобрения (навоз), среднее за три полных ротации севооборота (1996-2016 гг.), т/га

Обработка почвы	Контроль (без удобрений)			Навоз			Навоз, относительно контроля, %	
	1	2	± %	1	2	± %	1	2
<i>Озимая пшеница</i>								
Отвальная вспашка	2.85	4.40	+1.55/54	3.30	4.44	+1.14/35	+0.45/16	+0.04/1
Безотвальная обработка	2.82	4.32	+1.50/53	3.23	4.42	+1.19/37	+0.41/15	+0.10/2
Разница(%)	-0.03/1.1	-0.08/1.8		-0.07/2.1	-0.02/0.5			
<i>Сахарная свекла</i>								
Отвальная вспашка	27.2	33.9	+6.7/25	34.9	37.4	+2.5/7	+7.7/28	+3.5/10
Безотвальная обработка	29.9	30.8	+0.9/3	32.8	35.5	+2.7/8	+2.3/10	+4.7/15
Разница(%)	+2.7/9.9	-3.1/9.1		-2.1/6.0	-1.9/5.1			
<i>Кукуруза на зерно</i>								
Отвальная вспашка	4.76	5.14	+0.38/8	4.99	5.14	+0.15/3	+0.23/4.8	0/0
Безотвальная обработка	4.74	5.10	+0.36/8	4.82	5.11	+0.29/6	+0.08/1.7	+0.01/0
Разница(%)	-0.02/0	-0.04/1		-0.17/3	-0.03/6			

1 – севооборот без многолетних бобовых и злаковых трав; 2 – севооборот с многолетними бобовыми и злаковыми травами.

сахарной свеклы, тогда как кукуруза на зерно почти не реагирует на удобрение в любом севообороте.

Данные этого опыта также дают представление о преимуществах многолетних бобовых культур по сравнению с однолетними бобовыми, например горохом (таблица 6.6).

Таблица 6.6. Урожайность озимой пшеницы после разных предшественников при разных системах удобрения и обработки почвы, среднее за три полные ротации севооборотов (1996-2016 гг.), т/га

Обработка почвы	Контроль (без удобрений)			Навоз			Навоз + NPK		
	1a	1b	2	1a	1b	2	1a	1b	2
Отвальная вспашка	2.85	3.0	4.40	3.30	3.32	4.44	4.10	4.19	4.51
Безотвальная обработка	2.82	3.1	4.32	3.23	3.48	4.42	4.16	4.27	4.55

1 – севооборот без многолетних бобовых и злаковых трав; 1a – пшеница после кукурузы на силос; 1b – пшеница после гороха;

2 – севооборот с многолетними бобовыми и злаковыми травами (озимая пшеница после смеси люцерны и райграса).

Система обработки почвы не влияет на урожайность озимой пшеницы; урожаи остаются неизменными и после смеси люцерны и райграса, независимо от системы удобрения. Реакция озимой пшеницы на удобрение была почти такой же после гороха и после кукурузы на силос. Однолетние бобовые имеют много преимуществ перед небобовыми культурами, особенно по сравнению с черным паром, но их способность восстанавливать плодородие почвы меньше, чем у многолетних бобовых. Большая проблема для длинных севооборотов, которые включают многолетних бобовых и злаковых трав, состоит в том, как извлечь выгоду из этих культур. Старый способ – интегрировать животноводство в систему земледелия, непосредственно на ферме либо в партнерстве с животноводческими предприятиями. Этот вариант мы обсудим в следующей главе. В качестве альтернативы зеленая масса может быть использована в виде исходного сырья для производства биогаза, а дигестат (эфлюент) представляет собой первоклассное органическое удобрение (*Triboi and Triboi-Blondel, 2014*).

В том же многофакторном опыте неудобренные деланки содержат больше лабильного органического вещества в верхнем 20-сантиметровом слое, чем в нижнем слое почвы, независимо от севооборота и системы обработки почвы (таблица 6.7). На участках, удобренных навозом + NPK, наибольшее содержание лабильной фракции ПОС обнаруживается в севообороте со смесью люцерны и злаковой травы при безотвальной обработке почвы, и он лучше распределен «вниз по профилю». Включение многолетних бобовых и злаковых трав в севооборот обогащает более глубокие слои почвы органическим веществом при безотвальной обработке

почвы и соответственно при нулевой обработке почвы. Опыты с более глубоким внесением минеральных удобрений не показали никаких преимуществ в отношении урожайности. Однако культуры с глубокими корневыми системами могут перекачивать питательные вещества из глубины и удерживать их в верхнем слое почвы. Напротив, неглубокое укоренение является проблемой в условиях сухого климата в отношении противостояния сильным засухам.

Таблица 6.7. Содержание лабильного углерода¹ в типичном черноземе при различных системах обработки почвы и удобрения в севооборотах с многолетними бобовыми и злаковыми травами и без них, НИИПК *Selectia*, 2016 г.

Системы обработки почвы	Слой почвы (см)	Контроль (без удобрений)				Навоз + NPK			
		Севооборот без многолетних бобовых и злаковых трав		Севооборот с многолетними бобовыми и злаковыми травами		Севооборот без многолетних бобовых и злаковых трав		Севооборот с многолетними бобовыми и злаковыми травами	
		г/100 г	%	г/100 г	%	г/100 г	%	г/100 г	%
Отвальная вспашка	0-20	122.0	4.9	124.0	5.1	203.0	7.8	248.0	9.7
	20-40	54.0	2.4	61.0	2.8	9.0	0.4	49.0	2.2
	0-40	88.0	3.6	92.0	3.9	106.0	4.1	148.0	5.9
Безотвальная обработка	0-20	119.0	5.0	162.0	6.3	276.0	10.0	358.0	12.8
	20-40	30.0	1.4	57.0	2.5	0	0	71.0	3.0
	0-40	74.0	3.2	109.0	4.4	138.0	5.0	214.0	7.9

¹ Лабильный углерод определен по методу *Cambaradella*.

Наиболее заметной особенностью почв при нулевой обработке почвы является обилие и активность дождевых червей. Ньюман (*Newman*, 1988) сообщает о значительном уменьшении количества дождевых червей на пахоте по сравнению с залежью. Гектар засеянного травой сада в Англии может содержать до 8 миллионов дождевых червей общим весом 2,3 тонны. Пахотная земля поддерживает только четверть этого числа и массы, но популяция дождевых червей резко восстанавливается при нулевой обработке почвы и укрытии ее поверхности растительными остатками; Брионес и Шмидт (*Briones and Schmidt*, 2017) обнаружили удвоение численности и массы дождевых червей по отношению к популяции при вспашке. Еще одним значительным изменением в почвенной биоте при нулевой обработке почвы является доминирование грибов. При *no-till* длина гифов у поверхности почвы в 1,9–2,5 раза больше, чем при обычной обработке почвы, а микоризные сети, которые колонизируют корни, улучшают усвоение питательных веществ, особенно фосфатов (*Six and others*, 1999; 2000; *Frey and others*, 1999; *Triplett and Dik*, 2008). С другой стороны, снижение скорости минерализации ОВП может ограничить поступление азота, в зависимости от текстуры почвы и применяемых удобрений.

6.3. Урожайность и плодородие почв при отсутствии вспашки (*no-till*) и обычной обработке почвы

Почва деградирует, когда замкнутый круговорот питательных веществ целинных почв заменяется открытой системой пахотных, где инпутов (ресурсов) недостаточно для поддержания плодородия. Nosko (2011) отмечает, что после 40 лет вспашки *типичный чернозем* в лесостепи Украины был настолько деградирован, что земледелие должно рассматриваться как основной процесс почвообразования. Однако, несмотря на потерю зернистой структуры и повышенное выщелачивание карбонатов, почвы сохранили основные параметры чернозема, поэтому их можно восстановить при хорошем менеджменте (Krupenikov and others, 2011). Об ухудшении структуры почвы и истощении запасов углерода и азота при культивировании почв в Австрии сообщают Каспер и др. (Kasper and others, 2009). Напротив, в Каменной степи в России обнаружено, что наибольшая деградация структуры почвы в течение первых двух десятилетий вспашки происходила в слое почвы 0–10 см (Lebedeva and others, (2017). Авторы считают, что новое равновесие развивается так, что даже после 120 лет выращивания черноземы сохраняют относительно хорошую структуру.

Контрасты и противоречия в экспериментальных данных о влиянии обработки почвы в сравнении с нулевой обработкой можно объяснить различными почвами, погодой и менеджментом в разных местах. Лафонд и др. (Lafond and others, 2006) сообщили о практически одинаковом урожае для различных культур на черном черноземе в Канаде при нулевой и минимальной обработке, но при этом повысилась эффективность использования воды при *no-till*, благодаря симбиозу с микоризой и положительному воздействию *no-till* на урожайность озимой и яровой пшеницы, связанной со снижением листовых и корневых заболеваний. На том же типе почвы Малхи и др. (Malhi and others, 2006, 2007) сообщили о большей урожайности для всех культур в севообороте после трех лет *no-till* по сравнению с обычной обработкой почвы; *no-till* увеличил лабильные доли углерода и азота без значительных изменений общего содержания этих элементов. При этом объем растительных остатков на поверхности почвы имеет решающее значение для благоприятного воздействия на свойства почвы, устойчивость к эрозии почвы и урожайность. Cociu и др. (2010) из Национального института сельскохозяйственных исследований и развития (Фундуля, Румыния) выявили более высокую эффективность использования воды и увеличение урожайности озимой пшеницы и кукурузы при *no-till* обработке на выщелоченном черноземе, и отсутствие влияния на сою. Возможно, это связано с недостатком растительных остатков.

На северных Великих равнинах в США Халворсон и др. (Halvorson and others, 2002) обнаружили, что любая выгода от *no-till* на секвестрацию углерода полностью компенсируется включением черного пара в севооборот. В севооборотах без черного пара ежегодная секвестрация углерода при нулевой обработке составила 233 кг/га по сравнению с 25 кг/га при минимальной обработке почвы и потерями 141 кг/га при обычной обработке почвы. Ванден Байгаарт и др. (Vanden Bygaart and others, (2003) обнаружили увеличение ПОС при *no-till* в западной Канаде на $2,9 \pm 1,3$ т/га в течение 8–12 лет, а в восточной Канаде существенных изменений не произошло.

При более высоких фоновых уровнях ПОС потенциальная роль *no-till* в секвестрации углерода меньше, но, по словам *Malhi* и др. (2008), на одних и тех же почвах в одинаковом климате даже для почв с относительно высоким содержанием ПОС (5,5%) *no-till* улучшает их физические и биологические свойства. Умберто Бланко-Канку и др. (*Humberto Blanco-Canqui*, 2009, 2011) из Канзаса (США) сообщили, что *no-till* уменьшает восприимчивость почвы к уплотнению и эта выгода увеличивается под покровными культурами как с точки зрения содержания органического углерода в почве, так и ее физических свойств. Влияние покровных культур было отчетливо видно в слое почвы 0–7,5 см, но незначительно – для слоя 7,5–15 см; они обнаружили, что влияние покровных культур на уплотнение почвы, устойчивость к проникновению воды в структурные агрегаты почвы определялось количеством растительных остатков. Эбли Вик, специалист по улучшению состояния почвы из Университета штата Северная Дакота (США), наблюдал лучшую пропускную способность на полях, где применялись покровные культуры безотвальной вспашки, по сравнению с традиционно обрабатываемыми и засеваемыми полями как при посеве весной, так и при уборке осенью (*Abley Wick*, 2017).

6.4. Роль растительных остатков при *no-till*

При нулевой обработке почвы (*no-till*) корни растений остаются на месте. Остальные растительные остатки и исходные материалы остаются на поверхности почвы как первая линия защиты от эрозии почвы и засухи. Ранавосон и др. (*Ranaivoson and others*, 2017) обнаружили, что 8 т/га растительных остатков ограничивают испарение с поверхности почвы до 30% по сравнению с испарением с обнаженной почвы; 2 т/га растительных остатков значительно увеличивают инфильтрацию, а общий почвенный покров увеличивает инфильтрацию осадков в четыре раза по сравнению с голой почвой; накопление 4–5 т/га растительных остатков увеличивает запас ПОС на 0,38 т/га; 1 т/га растительных остатков может снизить всхожесть сорняков и их биомассу вдвое по сравнению с голой почвой, а максимальное подавление сорняков было достигнуто при 4 т сухого вещества на гектар. Они обнаружили умеренное влияние увеличенного количества растительных остатков на содержание NPK, а также на обилие мезо- и макрофауны. Остатки сельскохозяйственных культур особенно полезны для почв на склонах: на склонах с уклоном в 3 и 7% растительные остатки в количестве 4,5 т сухого вещества/га уменьшают разрушительный сток воды на 20 и 40% соответственно. И, конечно же, *no-till* предотвращает смещение почвы вниз по склону, так как лемех плуга поднимается вверх и вниз, тем самым способствуя усилению эрозионных процессов.

Blanco-Canqui and Lal (2009) опубликовали обзор литературы о влиянии растительных остатков на физические, химические и биологические свойства почвы. Физические свойства включают в себя следующие показатели: структурную стабильность, в том числе формирование поверхностной корки, и стабильность агрегатов; уплотнение, включая объемную массу и коэффициент дефляции; гидравлические свойства, включая пористость, инфильтрацию и удержание воды в почве; и теплопроводность. Влияние растительных остатков зависит от их

количества, качества и равномерности распределения по почве: чем больше, тем лучше – хотя чем ближе система приближается к устойчивому состоянию, тем меньше изменений следует ожидать. Выгоды проистекают из большей инфильтрации воды, меньшего испарения и увеличения удержания воды в результате более прочных структурных агрегатов и обогащения органическим веществом. Лучшие условия создаются для дождевых червей, которые улучшают структуру почвы и увеличивают проникновение и просачивание воды, а также лучшие условия для микроорганизмов почвы. На глинистых и суглинистых почвах штата Огайо интенсивность инфильтрации увеличилась при укрытии поверхности почвы остатками стеблей кукурузы в количестве 16 т/га, но только при нулевой обработке почвы. Такое же количество запаханных растительных остатков не увеличивало инфильтрацию воды. Остатки сельскохозяйственных культур с узким соотношением C:N (например, из соевых бобов) быстро разлагаются, поэтому они обеспечивают меньшую защиту, чем остатки с более широким соотношением C:N (например, злаки).

Удаление остатков урожая снимает защиту почвы от дождевых капель, иссушающего ветра и солнца. При бессменном выращивании кукурузы и нулевой обработке почвы удаление половины остатков стеблей в течение нескольких лет привело к потере стабильности почвенных агрегатов на 50–80% (*Blanco-Canqui and others*, 2009, 2011). Отсутствие почвенного покрова приводит к большим колебаниям температуры почвы, особенно на поверхности, а голая почва подвержена большему испарению, что означает меньшие запасы воды, доступной для сельскохозяйственных культур летом. *Franzluebbers* (2015) сообщил о повышении температуры почвенной поверхности в период с июня по август под кукурузой и соей с $8,0 \pm 2,7$ °C без растительных остатков до $11,5 \pm 1,4$ °C – с растительными остатками. Но более низкие температуры весной под мульчей остатков урожая могут задержать появление всходов и замедлить минерализацию ОВП.

Количество и качество растительных остатков также влияет на круговорот энергии и питательных веществ. Что касается кукурузного пояса США, большинство исследователей сообщают о повышении общего содержания C и N под влиянием растительных остатков, но без существенных изменений в отношении других макроэлементов (P, K, Ca) или микроэлементов (Mn, Zn, и др.), pH, емкости катионного обмена и электропроводности (*Blanco-Canqui and Lal*, 2009; *Karlen and others*, 2009; *Duiker and Lal*, 1999; *Turmel and others*, 2015).

Fanzluebbers (2015) считает, что для поддержания запасов ПОС необходимо вернуть не менее 2 т C/га/год (это эквивалентно 4,9 т/га биомассы). *Powlson* и др. (2011) проанализировали данные 25 опытов продолжительностью 6–56 лет с ежегодным включением или удалением соломы с полей. Они обнаружили значительное увеличение ПОС (до 10 процентов) только в шести опытах. Однако во всех опытах наблюдалось увеличение микробной биомассы или микробного C и N, что способствовало большей стабильности агрегатов почвы и проникновению воды. Поскольку остатки сельскохозяйственных культур имеют более высокую скорость круговорота, чем ОВП, их полезное воздействие можно лучше оценить по их влиянию на микробную биомассу почвы и ее улучшенные физические свойства. Подобные экспериментальные результаты были получены Лемке и др. (*Lemke and*

others, 2010) для чернозема при *no-till* в канадском Саскачеване (*Saskatchewan*); они рекомендуют сохранить как минимум половину растительных остатков и адекватное азотное удобрение. Другие исследователи не обнаружили положительного влияния растительных остатков на содержание С и N, а результаты зависят от конкретного участка.

Биологические свойства почвы напрямую зависят от удаления растительных остатков. Помимо более значительных колебаний температуры поверхности почвы и более низкой стабильности почвенных агрегатов, пищевая цепь почвенной биоты лишена доступной энергии (*Karlen and others*, 2009). Многолетние полевые опыты в восточной части штата Огайо показали, что при более чем 75-процентном покрытии почвы остатками стеблей кукурузы, среднее количество и масса дождевых червей на единицу площади было в 3 раза больше, чем при только 25-процентном покрытии почвы (*Blanco Canqui and Lal*, 2009); в опытах на бурых суглинках на склонах они обнаружили 20-процентное снижение урожая кукурузы на поле, где половина растительных остатков была удалена, и снижение на 30 процентов в том случае, когда все растительные остатки были удалены. Как отмечалось ранее, чем круче склон, тем больше пользы от растительных остатков. К сожалению, растительные остатки удаляются с поля во многих местах для топлива и сырья. Альтернативными источниками биотоплива могут быть просо (*Panicum virgatum* L.), мискантус (*Miscanthus sinensis* L.) и древесные культуры, которые могут расти на маргинальных или деградированных землях. Оценка различных видов биомассы для производства сырья демонстрирует следующий рейтинг основных культур: эвкалипт (288 ± 165 ГДж/га/год), сахарный тростник (159 ± 42 ГДж/га/год), мискантус (158 ± 32 ГДж/га/год), масличная пальма (146 ± 36 ГДж/га/год), просо (128 ± 26 ГДж/га/год), сахарная свекла (125 ± 50 ГДж/га/год) и различные зерновые культуры (36 ± 20 ГДж/га/год) – но в мире, который должен увеличить производство продуктов питания на 50-70 процентов к 2050 году, использование соломы для производства этанола сомнительно.

6.5. Консервативное земледелие

Процесс преобразования сельскохозяйственных предприятий в устойчивые системы, с одновременным обеспечением продовольственной и водной безопасности, сталкивается с большими проблемами. Достаточно упомянуть только три: остановка деградации земли, повышение плодородия почвы и адаптация к изменению климата. Любой способ должен обладать системным или целостным подходом, отстаиваемым Гиллером и другими (*Giller and others*, 2015). Это и есть консервативное земледелие (КЗ).

Принципы консервативного земледелия включают:

- *отсутствие механического воздействия на почву* путем посева непосредственно в необработанную почву, чтобы сохранить архитектуру порового пространства и минимизировать потерю органического вещества почвы;
- *постоянный, проницаемый почвенный покров* растительными остатками, которые защищают поверхность почвы от солнца, ветра и дождя, а также подпитывают жизнь в почве;

- *диверсификацию культур* путем использования севооборота или ассоциаций культур, которые контролируют сорняки, болезни и вредителей.

Новая парадигма работает практически повсеместно по той простой причине, что она устраняет разрушительное нарушение живой почвы и повсеместное воздействие стихийных явлений. В то же время она сохраняет водные ресурсы, а именно:

- *максимальную инфильтрацию дождя и талой воды* проницаемой поверхностью, защищенной густой растительностью или поверхностной мульчей, что сокращает сток, эрозию и внезапные наводнения;
- *максимальную задержку воды* благодаря хорошо структурированной, богатой гумусом почве, которая пронизана глубоко разветвленными корнями, что создает устойчивость к засухе и доступность воды и питательных веществ по всему профилю почвы, а не только в пахотном слое;
- *просачивание избыточной воды* через крупные поры, проходы корней и дождевых червей для пополнения грунтовых вод и, в сухую погоду, непрерывный подъем грунтовых вод в корневую зону.

6.5.1. Извлеченные уроки

Механические меры по сохранению почвы никогда не были широко приняты, часто от них отказывались, потому что они не оплачиваются. Фермерам платят за урожай и скот: им не платят за оказание экологических услуг. В отличие от этого, КЗ платит, экономя время, силы и деньги, а также обеспечивая экологические выгоды. Но это создает свои собственные проблемы: барьеры для принятия КЗ включают необходимость переучивания и переоснащения, а также страх снижения урожайности. На самом деле урожайность не всегда падает, и было извлечено несколько уроков, которые могут помочь избежать или преодолеть эту и другие предполагаемые проблемы (*John Landers*, личное общение):

1. Если принятие *no-till* совпадает с необходимостью замены почвообрабатывающих орудий или тракторов, большая экономия может быть достигнута, если не покупать это оборудование, а вместо этого купить или адаптировать сеялки *no-till* и намного меньшие тракторы.
2. Первый закон КЗ: удалите все физические и химические ограничения перед принятием *no-till*. Это часто игнорировалось, но плужная подошва должна быть разбита глубокой вспашкой, а истощенные почвы требуют внесения навоза или другого органического удобрения для повышения продуктивности.
3. Покровы почвы более чем на 70%, устраняет эрозию почвы: на поверхности почвы должно быть достаточно мульчи, чтобы защитить ее от капель дождя, поддерживать быстрое проникновение воды и уменьшить испарение.
4. Равномерное распределение растительных остатков имеет важное значение для качественного посева, поэтому используются измельчители соломы при высокой биомассе и разбрасыватели при низкой биомассе. При наличии ветрозащитных полос растительных остатков посев производится по диагонали, чтобы очистить сеялку. Для лучшей производительности сеялки

посев производится либо сразу после высыхания (до того, как зеленые растения потеряют тургор), либо обожгите, пока растительный слой не станет сухим и хрупким, так как увядшие зеленые стебли трудно разрезать и вставить в семенную щель сеялки. Посев до высыхания стеблей является рискованным, потому что погода или остатки могут препятствовать ее применению до появления всходов.

5. Получение достаточного количества биомассы (> 6 т/га/год) и энергичное укоренение имеют решающее значение для восстановления структуры почвы, и это требует времени. Севооборот должен включать многолетние травы для биомассы, а включение многолетних бобовых растений уменьшает дефицит азота. При любых обстоятельствах возвращение выращенного продукта в почву в качестве растительных остатков обеспечивает жизнь почвы, которая, имея половину шансов, является самодостаточной.
6. Долгосрочная стратегия использования питательных веществ должна заключаться в удобрении всего севооборота, а не отдельной культуры, но это возможно только при высоком плодородии. Статус таких элементов, как фосфор и калий, улучшается при нулевой обработке, поэтому эти питательные вещества можно применять в меньшем количестве. С другой стороны, поверхностная мульча закрепляет азот, внесенный на поверхность почвы. Поэтому в первые годы нулевой обработки почвы необходимо увеличить количество применяемого азота на кукурузе на 25-30 процентов. А если дождя нет, мочевины, внесенная на поверхность, подвержена потерям до 70%, потому что растительные остатки могут содержать уреазу, которая улетучивается в виде аммиака, поэтому азотные удобрения следует вносить в почву. Там, где требуется известь, она может быть разбросана по поверхности, но, по сравнению со вспашкой, подкормку следует уменьшить максимум до 1–2 т/га в зависимости от текстуры почвы; избыток извести вызывает дефицит микроэлементов (например, марганца в соевых бобах или цинка в кукурузе); этот эффект также, по-видимому, благоприятствует нематодам.
7. Основной целью вспашки является уничтожение сорняков. Коммерческие фермерские хозяйства в Северной и Южной Америке, Австралии и Западной Европе при *no-till* используют гербицид для борьбы с сорняками. В отличие от этого, там, где большинство фермеров являются мелкими землевладельцами, КЗ представляется как сельское хозяйство с низким уровнем вложений (инпутов). Вопрос о том, подходит ли оно для мелких фермеров, является спорным из-за возросшего спроса на рабочую силу для прополки. Если земля не вспашана, мало мелких фермеров имеют доступ к гербицидам, а также потому, что для кормления скота необходимы остатки сельскохозяйственных культур. *No-till* без мульчи катастрофична: она приводит к уплотнению почвы и эрозионному стоку в течение нескольких минут после начала сильного дождя. Борьба с сорняками может быть достигнута с помощью севооборота, низкорослой покровной культуры или, в крайнем случае, минимальной обработкой почвы. Более сильнорослая культура, предшествующая основной, может уменьшить, а иногда и устранить необходимость в гербициде; овес или рожь могут быть уничтожены в результате скручивания между фаза-

ми выметывания метелки и стадией молочной спелости основной культуры, посеянной в мульчу. Но это не работает в случае с просом, у которого есть побеги разного возраста. Сочетание в севообороте зерновых культур и пастбищ сокращает численность вредителей, болезней и сорняков и увеличивает общий доход и пользу для обеих сторон, одновременно восстанавливая структуру почвы.

6.5.2. За и против (плюсы и минусы) консервативного земледелия

У консервативного земледелия (КЗ) есть плюсы и минусы. К плюсам можно отнести:

- значительное снижение производственных затрат: меньше рабочей силы, меньше топлива, меньше машин и, в то же время, сопоставимая или лучшая урожайность;
- повышение плодородия почв, включая здоровье растений и водно-питательный баланс, что обеспечивает более устойчивые урожаи при меньшей потребности в дорогостоящих промышленных инпутах;
- уменьшение эрозии почвы, что способствует меньшему заилению ручьев и водоемов;
- большую инфильтрацию дождя и талых вод, меньший сток и, соответственно, лучшую подпитку подземных вод;
- меньшее загрязнение токсичными веществами и меньшее вымывание питательных веществ в поверхностные и подземные воды, что способствует эвтрофикации (цветению) водных экосистем;
- увеличение биоразнообразия почвы в результате разнообразных севооборотов и меньшего нарушения почвы;
- меньший выброс парниковых газов;
- большая секвестрация углерода;
- меньшее затопление, повреждение инфраструктуры и высыхание водоемов.

Минусы, часто рассматриваемые как препятствия для принятия КЗ, включают:

- необходимость в специальных сеялках: первопроходцам КЗ пришлось адаптировать свое имеющееся оборудование, особенно для прямого посева, но поскольку КЗ распространилось по всему миру, производители вышли на новый рынок; в настоящее время широко доступен ряд машин для прямого посева;
- проблемы с сорняками, вредителями и болезнями и обеспокоенность по поводу химического загрязнения окружающей среды;
- недостаток знаний и навыков нового менеджмента (*Stagnari and others, 2009*).

Разрыв между ценами на выходе из фермерских хозяйств и стоимостью индустриальных инпутов является хорошим аргументом, чтобы убедить фермеров в необходимости перехода на новую систему земледелия. Это не может быть упущено директивными органами. Например, в Республике Молдова в 1995 году от продажи одной тонны зерна (озимой пшеницы) можно было закупить 1000 литров дизельного топлива. С тех пор отпускная цена пшеницы удвоилась, но

доход от продажи одной тонны пшеницы теперь позволяет приобрести только 150 литров топлива! Это имеет экономические, экологические и социальные последствия.

Неудивительно, что фермеров привлекают немедленные выгоды от КЗ – нулевая обработка почвы означает большую экономию топлива и рабочей силы. Но принятие только одного фрагмента новой системы земледелия вызывает проблемы. Без эффективного севооборота *no-till* может усугубить проблемы с сорняками, вредителями, болезнями и недостатком азота. Вся система должна быть адаптирована к конкретным условиям каждого поля, фермы и ландшафта – с учетом менеджмента сорняков, вредителей, болезней, питательных веществ, покровных культур и при наличии подходящего оборудования. Даже при наличии хорошей системы земледелия, охватывающей все компоненты КЗ, должен быть переходный период в 3-4 года, чтобы улучшить качество почвы и дать новой экосистеме и фермеру время для корректировки (Montgomery, 2017; Reynolds, 2018). Готовность к переменам должна сопровождаться знаниями и умением учиться на ошибках.

В переходный период потеря урожая не редкость: это может быть результатом удаления стерни, дефицита азота и фосфора, поражения сорняками, плохой всхожести семян в результате недостаточного контакта семян с почвой или чрезмерного уплотнения почвы (Lal, 2015). Через несколько лет урожайность может быть такой же или лучше, чем при отвальной вспашке, но конечная цель – не самая высокая достижимая урожайность; она состоит в получении разумного, стабильного урожая в благоприятных и в неблагоприятных условиях. Метаанализ, представленный Pittelkow и др. (2005), показал, что из 5463 наблюдений урожайность снизилась примерно на 10 процентов в 610 случаях; любой отрицательный эффект был значительно уменьшен комбинацией мульчирования и севооборота. Тем не менее, результаты внедрения КЗ не всегда соответствуют нашим ожиданиям. Результаты зависят от конкретного участка и должны анализироваться с учетом применяемой системы менеджмента, в частности количества и качества накопленных растительных остатков, типа почвы и погоды.

Согласно КЗ улавливание чистого углерода составляет 0,1–0,5 т/га/год (González-Sánchez and others, 2012; Amado and others, 2006; Corsi and others, 2014; De Moraes Sá and others, 2013) в зависимости от биомассы, возвращаемой в почву, типа почвы и плодородия (особенно от предшествующего удобрения почвы), продолжительности вегетационного периода, севооборота и менеджмента. Накопление органического вещества заметно больше в верхних нескольких сантиметрах почвы, в нижних – может даже уменьшиться; органическое вещество почвы в верхних слоях состоит из неустойчивых, лабильных фракций – их превращение в устойчивый гумус неясно. По этой причине некоторые исследователи предлагают производить отбор проб с большей толщины почвы (до одного метра) для оценки способности системы КЗ улавливать углерод (Kirkegaard and others, 2014; Palm and others, 2014; Franzluebbers, 2010; Humberto Blanco-Canqui and Lal, 2008).

В настоящее время *no-till* господствует на большей части пахотных земель в Австралии, где одним из принципов является интеграция растениеводства и животноводства; пастбища, основанные на многолетних бобовых, чередуются с однолетними культурами. Такая система ведения сельского хозяйства снижает риски и нестабильность доходов. Помимо увеличения секвестрации углерода в

подпочвенном слое, улучшения структуры почвы и фиксации атмосферного азота, многолетние бобовые растения контролируют многолетние сорняки. Кроме того, легкий выпас озимых злаков овцами и менеджмент стадий выпаса не наносит вреда посевам или почвам (Kirkegaard and others, 2014; Hunt and others, 2016).

Увеличение секвестрации углерода компенсирует любое возможное повышение выбросов N_2O и CH_4 (Palm and others, 2014). Остатки урожая, оставленные на поверхности почвы, увеличивают микробную биомассу, в которой преобладают грибы, поэтому эффективность использования питательных веществ увеличивается в результате более медленного разложения; растительные остатки создают хорошие условия для дождевых червей, которые заменяют механическую обработку почвы биологическим перемешиванием. Комбинация растительных остатков на поверхности почвы, глубоко укореняющихся основных культур и покровных культур в севооборотах, восстанавливает плодородие почвы и в то же время подавляет вредителей и уменьшает болезни – чем больше разнообразие почвенной биоты, тем больше возможности почвы для подавления патогенных микроорганизмов. После того как системы «нулевой обработки» были созданы, они противостоят эрозии и засухе и они щедро оплачиваются благодаря значительно сокращенным расходам на топливо и рабочую силу. Учитывая значительный ущерб, нанесенный всевозможными видами культивирования, и его незначительный вклад в урожайность, наилучшим подходом в будущем должна быть замена механической обработки почвы биологической обработкой (Kant, 1980).

Несмотря на преимущества КЗ, существует некоторая обеспокоенность тем, что быстрая инфильтрация и свободный дренаж могут ускорить выщелачивание нитратов и пестицидов. Еще более серьезно то, что растет опасение по поводу использования пестицидов, в частности глифосата, самого популярного гербицида перед посевом (Schwarzer, 2018). Комбинированные междисциплинарные исследования КЗ, безопасности пищевых продуктов и качества воды необходимы для успешного расширения и развития КЗ. Среди приоритетов КЗ следующие аргументы:

1. Всемирная сеть долгосрочных многофакторных опытов в репрезентативных почвенно-климатических условиях для оценки: действия и взаимодействия между основными факторами каждой системы земледелия (чередование культур, системы обработки почвы и удобрения в севообороте) на качество почвы (физические, биологические и химические свойства) и урожайность; вклад почвы в формирование урожая; и каковы оптимальные и критические уровни органического вещества почвы для устойчивого менеджмента почвы.
2. Секвестрация углерода и выбросы парниковых газов из различных компонентов систем земледелия и из систем земледелия с различными экологическими структурами.
3. Количество и качество растительных остатков, которые должны сохраняться на поверхности почвы для обеспечения экосистемных услуг; допустимые уровни удаления растительных остатков на почвах с повышенным и пониженным риском эрозии.
4. Альтернативные источники энергии, заменяющие использование растительных остатков в качестве топлива.
5. Покровные культуры, их менеджмент в севооборотах и их совместимость с основными культурами (наличие воды, аллелопатические эффекты и т. д.).

6. Сколько азота следует использовать для удовлетворения потребностей сельскохозяйственных культур без усугубления выщелачивания нитратов и выбросов парниковых газов? Как снизить нормы внесения азота из минеральных удобрений?
7. Последнее, но не менее важное: контроль сорняков: некоторые аспекты этой проблемы сейчас обсуждаются.

6.6. Контроль сорняков: отсутствие вспашки (*no-till*), агрохимикаты, биоразнообразие и здоровье общества

Тотальные гербициды сделали нулевую обработку почвы жизнеспособным предложением, а подсушивание почвы перед посевом остается наиболее важной и сложной операцией при нулевой обработке почвы. Начиная с его введения в 1970-х годах, наиболее популярным был гербицид глифосат (N – фосфометилглицин), который убивает зеленую растительность при контакте, но адсорбируется и инактивируется коллоидами почвы и органическим веществом, не оставляя остаточных эффектов – или мы так полагали. В последние несколько лет результаты лабораторных исследований на животных вызвали обеспокоенность по поводу токсичности глифосата. В 2015 году Международное агентство по исследованию рака назвало его «вероятным канцерогеном для человека». Страстный крик защитников окружающей среды, подхваченный демагогами, звучит так: «Больше никаких пестицидов!» В реальной жизни компромиссы необходимы. Нам нужно пересмотреть все пестициды, не только глифосат, но и вопрос стал очень политизированным, и использование глифосата в ЕС было разрешено только до декабря 2022 года – после этой даты может быть введен запрет.

Обычно незнание экологии и биологии сорняков компенсируется применением гербицидов. Индустриально-химический подход также является первым выбором для огромных ферм, насчитывающих тысячи или десятки тысяч гектаров, где не хватает рабочей силы, а менеджмент гербицидов растянут. Тем не менее, длительное исследование, проведенное *Lindwall* и *Sonntag* (2010), развеяло миф о более интенсивном использовании гербицидов в системах без обработки. После внесения системного гербицида перед посевом фермеры КЗ используют те же химические аэрозоли, что и в обычной практике, но используют их значительно меньше. Около 94% глифосата используется в традиционном сельском хозяйстве, наиболее широко в качестве гербицида после появления всходов на генетически модифицированных (*Roundup-ready*) соевых бобах, кукурузе и хлопке, но также для получения однородной продукции при уборке урожая. Только 6% используется в КЗ – исключительно в качестве гербицида перед посевом, который не дает ему прямого доступа к пищевой цепочке. Самое последнее и тщательное исследование воздействия глифосата на почвенную микробиологию (*Kepler and others*, 2019) не обнаруживает воздействия на почвенные сообщества, ранее не подвергавшиеся воздействию гербицида. В системах земледелия, где обычно применяется глифосат, сообщества грибов и прокариот зависят не от воздействия глифосата, а от обработки почвы и добавления органических веществ, связанных с различными методами управления. Это говорит о том, что

обычные нормы использования глифосата не изменяют микробные сообщества почвы.

Применение других гербицидов, которые необходимо смешивать с почвой, действие которых зависит от их растворимости в почвенном растворе, значительно снижает риск выщелачивания в грунтовые воды. Более того, сокращение стока и сокращение эрозии почвы на 70–90% в результате воздействия КЗ снижает загрязнение и эвтрофикацию поверхностных вод сельскохозяйственными химикатами – и значительно снижает затраты на очистку муниципальной воды, взятой из поверхностных источников. Аналогичным образом усиленное пополнение водоносных горизонтов увеличивает запасы подземных вод и сток в сухой сезон.

Насколько мы можем судить, КЗ полезно для биоразнообразия и не представляет угрозы для здоровья населения. Баланс системы настолько положительный для окружающей среды, что оставшиеся без ответа вопросы загрязнения пищевых продуктов и загрязнения воды, которые, как уже доказано, имеют меньший риск, чем при обычной практике ведения сельского хозяйства, не должны использоваться в качестве сдерживающего фактора для принятия КЗ в пользу сохранения обычных методов. Джон Ландерс (*John Landers*, 1994), сам являющийся пионером нулевой обработки почвы, и в течение сорока лет Исполнительный секретарь Бразильской ассоциации фермеров, занимающихся нулевой обработкой почвы в регионе Серрадо, рассмотрел способы менеджмента для наименьшего использования сельскохозяйственных химикатов:

1. Озабоченность эрозией почвы, задержкой с посевом и небольшой прибылью.
2. Готовность принять более высокий уровень менеджмента.
3. Признание нулевой обработки почвы как правильное решение; принятие новых принципов.
4. Принятие нулевой обработки почвы – обеспечение большего контакта с полем и динамикой природы, повышение осведомленности о более широком положительном воздействии на окружающую среду и улучшение технических возможностей.
5. Использование более безопасных и менее загрязняющих агрохимикатов и повышенная осторожность при их применении.
6. Использование методов биологического контроля, в частности разнообразных севооборотов, покровных культур и комплексной борьбы с вредителями. Всё это приводит к сокращению использования агрохимикатов.

В Бразилии этот путь поддерживается на местном уровне *Clubes Amigos da Terra*, в котором фермеры учатся друг у друга и совместно разрабатывают новую систему земледелия. Были разработаны субтропические системы для мелких фермеров, которые устраняют необходимость в гербицидах, и даже в тропическом климате фермеры, применяющие передовые методы КЗ, со временем испытывают значительное снижение давления сорняков, вредителей и болезней и, таким образом, не нуждаются в том, чтобы применять любые пестициды в течение длительного времени (*Friedrich and Kassam*, 2012).

Тем не менее, если токсичные химические вещества попадают в пищевую цепочку или влияют на почвенную флору и фауну, то поиск альтернативы должен быть приоритетом. Лучшая защита – надежная многолетняя культура, которая

обеспечивает плотный почвенный покров – селекция многолетних злаков будет бесконечно более полезной, чем селекция на устойчивость к гербицидам! Между тем, место для начала – севооборот. Чем дольше продолжительность севооборота и чем больше разнообразие культур в нем, тем выше способность подавлять сорняки. Покровные культуры, смеси культур и все вместе имеют огромный, неисследованный потенциал для борьбы с сорняками, а смеси различных многолетних культур очень эффективны для борьбы с многолетними сорняками (*Nichols and others*, 2015). Разнообразие сельскохозяйственных культур создает биоразнообразие в почве, что способствует более здоровой корневой системе для повышения способности культурных растений конкурировать с сорняками.

Зерновые культуры различаются по своей способности подавлять сорняки; есть большие различия даже в пределах одной ботанической семьи – например, озимая рожь является лучшим конкурентом, чем озимая пшеница, потому что она быстро покрывает почву и сильно кустится. Войлочное покрытие растительных остатков на поверхности почвы также дает растениям раннее преимущество, потому что прорастание семян сорняков задерживается (*Chauhan and others*, 2012). Семена сорняков могут прорасти из двух верхних сантиметров почвы, поэтому в ненарушенной почве запас семян сорняков истощается легче, чем при плужной вспашке, где с каждым проходом на поверхность поступает больше семян. Само собой разумеется, что такие профилактические меры, как очистка семян и срезание сорняков до осыпания и рассеивания семян также важны.

Инновационные фермеры постоянно изобретают и разрабатывают новые подходы. В ранних работах по органическому земледелию в Институте Родейла в Пенсильвании (*Moyer*, 2011) глифосат заменили покровными культурами, посеянными осенью и прикатанными весной с помощью специального катка (*roller-crimper*). Основную культуру затем можно высевать в мульчу с помощью сеялки для прямого посева (*no-till planter*). Один из многих других примеров появился в недавней статье, опубликованной в *Progressive Farmer* (*Winsor*, 2019). Речь в публикации шла о *Loran Steinlage* – фермере из Айовы, доказывающем преимущества использования озимой ржи в качестве покровной культуры, которая помогает увеличить содержание органического вещества в почве и одновременно служит естественным гербицидом. Он также использует смеси покровных культур между рядами кукурузы: гречиха, масличная редька, однолетний райграс, яровой рапс и другие, служащие горючим для почвенной биоты, что улучшает структуру почвы и повышает устойчивость к засухе.

Следуя примеру Виргилия и Либиха, мы должны учиться на сорняках – они являются хорошими показателями(индикаторами) плодородия почвы. Чем лучше условия, созданные для посева, тем лучше культурные растения могут конкурировать с сорняками. Принимая во внимание биологические и экологические особенности сорняков и их приспособляемость к окружающей среде, может быть применен комплекс мер для поддержания их ниже экономического порога вредоносности в течение всего вегетационного периода. Гербициды должны быть последней линией защиты. Среди тем, требующих дополнительного изучения, отметим следующие:

1. Влияние различной последовательности культур и удобрений на уровень засоренности посевов.

2. Влияние растительных остатков, их количества и качества, включая аллелопатическое их влияние на всхожесть семян сорняков и засоренность посевов.
3. Программы селекции для культур с лучшей способностью подавлять сорняки.
4. Сроки и нормы высева, плотность и распределение сельскохозяйственных культур, совместные посевы в междурядья, смеси разных сортов и покровные культуры как меры снижения засоренности посевов.
5. Оценка экономических порогов вредоносности для однолетних и многолетних сорняков с точки зрения качества и биомассы различных культур в разных регионах.

6.7. Выводы

1. Обработка почвы является спорным вопросом, но пахать или не пахать – не это реальная проблема. Различные виды обработки почвы должны оцениваться в контексте конкретных систем земледелия или в многофакторных опытах, чтобы оценить действие и взаимодействие по крайней мере трех основных компонентов каждой системы земледелия (чередование культур, обработка почвы и удобрение) на урожайность и плодородие почвы.
2. Многолетний полевой опыт по различным системам обработки почвы в севообороте на типичном черноземе Бельцкой степи не показал различий в объемной массе почвы, весенних запасах почвенной влаги или урожайности, связанных с обработкой почвы. В многофакторном опыте, где специально изучали действие и взаимодействие между чередованием культур, двумя системам обработки почвы (отвальный и безотвальный) и тремя системами удобрения в севообороте, обработка почвы не оказала существенного влияния на урожайность.
3. Консервативное земледелие (КЗ) основано на трех принципах: отсутствие механического нарушения почвы, наличие почвенного покрова из растительных остатков, которые защищают поверхность, а также подпитывают жизнь в почве, и диверсификация сельскохозяйственных культур посредством севооборотов или ассоциаций сельскохозяйственных культур, которые контролируют сорняки, болезни и вредителей. Новая парадигма работает практически повсеместно по той простой причине, что она устраняет разрушительное нарушение живой почвы путем вспашки и ежедневного воздействия солнца, ветра и дождя.
4. Первый закон консервативного земледелия – снять все физические и химические ограничения перед переходом к *no-till* – часто игнорируется. Плужная подошва должна быть разрушена глубокой обработкой; возвращение растительных (органических) остатков в почву питает жизнь почвы, которая, при восполнении энергетических потерь может стать саморегулируемой. Севообороты должны включать смесь многолетних злаковых трав и бобовых культур для адекватного производства биомассы и биологической фиксации азота. Навоз – хороший источник лабильного ОВП.

5. *No-till* – самый перспективный подход к обработке почвы в контексте КЗ. Его влияние на запасы ОВП неоднозначно, но оно никогда не приносит никакого вреда и приносит много агрономических, экономических и экологических выгод.
6. Сохранение растительных остатков на поверхности почвы также имеет решающее значение. Оптимальное количество растительных остатков для предотвращения эрозии почвы, появления сорняков, вредителей и болезней зависит от ландшафта и системы менеджмента. Покрытие поверхности почвы только на 70% уже может предотвратить эрозию почвы.
7. Тотальные гербициды сделали нулевую обработку почвы жизнеспособным коммерческим предложением, а сохранение воды в почве перед посевом остается наиболее важной и сложной операцией при нулевой обработке почвы. Опасение по поводу токсичности глифосата стимулирует поиск альтернативных способов контроля сорняков, вредителей и болезней. Основными среди них являются более сложные севообороты, включающие покровные культуры, которые можно прикатать специальным катком до посева основной культуры.
8. Переход к системе консервативного земледелия в сельском хозяйстве является сложным процессом. Требуется переходный период для улучшения качества почвы, чтобы изменить ее жизненный цикл, а фермеру – научиться менеджменту этой новой системы. Более быстрое принятие консервативного земледелия (КЗ) требует поддерживающей политики, которая может включать оплату экологических услуг, предоставляемых фермерами, и поддержку производства биогаза.

Список литературы

- Amado TJC, C Bayer, P Conceição and others 2006 Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *Journal of Environmental Quality* 35, 4, 1599-1607
- Blanco-Canqui H, MM Mikha, DR Presley & MM Claassen 2011 Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 75, 4, 1471-1482
- Blanco-Canqui H, LR Stone, AJ Schlegel and others 2009 No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. *Soil Science Society of America Journal* 73, 6, 1871-1879
- Blanco-Canqui H & R Lal 2009 Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28, 139-163
- Boincean BP 2011 Soil tillage-tendencies and perspectives. *Akademios* 3, 22, 61-67 (Romanian)
- Boaghi IV & LI Bulat 2014 Primary soil tillage in rotations of the main field crops in Moldova. 273-282 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht
- Briones MJI & O Schmidt 2017 Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology* 23, 10, 4396-4419
- Chauhen BS, RG Singh & G Mahejon 2012 Ecology and management of weeds under conservation agriculture: a review. *Crop Protection* 38, 57-65

- Cociu A, GV Zaharia & N Constantin 2010 Tillage system effects on water use and grain yield of winter wheat, maize and soybean in rotation. *Romanian Agricultural Research* 27, 69-80
- Corsi S, T Friedrich, A Kassam & M Pisante 2014 A review of carbon sequestration through conservation agriculture, 205-207. In LK Heng and others (editors) *Proceedings of international symposium on managing soils for food security and climate change adaptation and mitigation*. FAO, Rome
- De Moraes Sá JC, J Bürkner Dos Santos, R Lal and others 2013 Soil-specific inventories of landscape carbon and nitrogen stocks under no-till and native vegetation to estimate carbon offset in a subtropical ecosystem. *Soil Science Society of America Journal* 76, 7, 2094-2110
- Dick WA 1984 Influence of long-term tillage and rotation combinations on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal* 48, 569-574
- Dokuchaev VV 1883 *Russian chernozem*. Independent Society for Economics, St Petersburg. *Second edition with foreword by VR Williams, 1952*. State Publisher for Agricultural Literature, Moscow (English translation 1967 Israeli Program for Scientific Translations, Jerusalem)
- Duiker SW & R Lal 1999 Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in central Ohio. *Soil and Tillage Research* 52, 73-81
- Faulkner E 1943 *Plowman's Folly*. University of Oklahoma Press, Norman OK
- Franzluebbers AJ 2010 Will we allow soil carbon to feed our needs? *Carbon Management* 1, 2, 237-251
- Franzluebbers AJ 2015 Farming strategies to fuel bioenergy demands and facilitate essential soil services. *Geoderma* 251-258, 259-260
- Frey SD, ET Elliott & K Paustian 1999 Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 573-585
- Friedrich T & A Kassam 2012 No-till farming and the environment: Do no-till systems require more chemicals? *Outlooks on Pest Management*, August, 153-157
- Giller KE, JA Andersson, M Crobeels and others 2015 Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science* 6, 1-14
- González-Sánchez EJ, M Moreno-Garcia, A Kassam and others 2017 *Conservation agriculture: making climate change mitigation and adaptation real in Europe*. ECAF www.ecaf.org
- González-Sánchez EJ, R Ordóñez-Fernández, R Carbonell-Bajollo and others 2012 A meta-analysis of atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. *Soil Tillage Research* 122, 52-60
- González-Sánchez EJ, O Veroz-González, G Blanco-Roldán and others 2014 A renewed view on conservation agriculture and its evolution over the last decade in Spain. *Soil and Tillage Research* 146, 204-212
- Grove JH, RC Ward & RR Weil 2015 Nutrient stratification in no-till soils. *Science* 374-381
- Halvorson AD, BJ Wienhold & AL Black 2002 Tillage, nitrogen and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal* 66, 906-912
- Hunt JR, AD Swan, NA Fettell and others 2016 Sheep grazing on crop residues does not reduce crop yields on no-till, controlled traffic farming systems in an equi-seasonal rainfall environment. *Field Crops Research* 196, 22-32
- Kant G 1980 *Biological crop science: Biological possibilities of agroecosystems*. Agropromizdat, Moscow (Russian, translation from the German)
- Karlen D, R Lal, R Follett and others 2009 Crop residues: the rest of the story. *Environmental Science and Technology* 43, 8011-8015
- Kasper M, GD Buchan, A Mentler A & WEH Blum 2009 Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil and Tillage Research* 105, 192-199
- Kassam A, T Friedrich & R Derpsch 2017 Global spread of conservation agriculture: interim update 2015/6. *7th World Congress on Conservation Agriculture 1-4 Aug 2017*. Rosario – update to Int J Env Studies 22019
- Kepler RM, D Epp-Schmidt, SA Yarwood and others 2019 Soil microbial communities in diverse ecosystems exposed to glyphosate. *bioRxiv preprint*. Doi:<http://dx.doi.org/10.1101/484055>
- Kirkegaard JA, MK Conyers, JR Hunt and others 2014 Sense and nonsense in conservation agriculture: principles, pragmatism and productivity in Australian mixed farming systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 187, 133-145

- Krupenikov IA, BP Boincean & DL Dent 2011 *The black earth. Ecological principles for sustainable agriculture on chernozem soils*. Springer, Dordrecht
- Lafond GP, WE May, FC Stevenson & DA Derksen 2006 Effects of tillage systems and rotations on crop production for a thin Black Chernozem in the Canadian Prairies. *Soil and Tillage Research* 89, 232-245
- Lal R 2015 Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of soil and water conservation* 70, 3, 55A-62A
- Landers JN (editor) 1994 *Fascículo de experiências de plantio direto no Cerrado* (Zero tillage manual for the Cerrado). APDC, Goiânia (Portuguese)
- Lebedeva II, YI Cheverdin, TV Titova and others 2017 Structural state of Migrational-mycelial (Typical) Agrochernozems of the Kamennaya steppe on ploughed fields of different areas. *Eurasian Soil Science* 50, 2, 218-228
- Lemke RL, AJ Vanden Bygaart, CA Campbell and others 2010 Crop residue removal and fertilizer N effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 135, 42-51
- Lindwall CW & B Sonntag (editors) 2010 *Landscape transformed: the history of conservation tillage and direct seeding*. Knowledge, impact and society, University of Saskatchewan, Saskatoon
- Malhi SS & R Lemke 2007 Tillage, crop residue and N fertilizer effects on crop yields, nutrient uptake, soil quality and nitrous oxide gas emissions in a second 4-yr rotation cycle. *Soil and Tillage Research* 96, 1, 269-283
- Malhi SS, AP Moulin, AM Johnston & HR Kutcher 2008 Short-term and long-term effects of tillage and crop rotation on soil physical properties, organic C and N in a Black Chernozem in northeastern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science* 88, 273-282
- Malitev TS 1983 *Thoughts about yields. Vol.1*. Southern Urals Book Publisher, Celjabinsk (Russian)
- Montgomery DR 2017 *Growing a revolution. Bringing our soil back to life*. WW Norton and Company, New York
- Moyer J 2011 *Organic no-till farming. Advancing no-till agriculture (crops, soil, equipment)*. Acres USA, Austin TE
- Newman J 1988 Earthworms. 508-510 in A Wilde (editor) *Russel's Soil conditions and plant growth. Eleventh edition*. Longman, Harlow and Wiley, New York
- Nichols V, N Verhulst, R Cox & B Govaers 2015 Weed dynamics and conservation agriculture principles: a review. *Field Crops Research* 183, 56-68
- Nosko BS 2011 The formation of the agronomic *Typical chernozem* profile in the Ukrainian forest-steppe after plowing virgin steppe and fallow soils. *Eurasian Soil Science* 46, 3, 325-336
- Palm C, H Blanco-Canqui, F De Clerk and others 2014 Conservation agriculture and ecosystem services: an overview. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 187, 1, 87-105
- Pittelkow CM, X Liang, BA Linquist and others 2005 When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research* 183, 156-168
- Powlson DS, MJ Glendining, K Coleman & AP Whitmore 2011 Implications for soil properties of removing cereal straw: results from long-term studies. *Agronomy Journal* 13, 1, 279-287
- Ranaivoson L, K Naudin, A Ripoché and others 2017 Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37
- Reynolds AJ 2018 A farmer's perspective on sustainable agriculture: fifteen years of conservation agriculture's effect on soil and water health. In JA Allan, M Keulertz, A Colman & B Bromwich (editors) *The Oxford handbook of food, water and society*. Oxford University Press, New York
- Schwarzer S 2018 *Alternatives to the use of glyphosate*. Foresight Brief. UN Environment Geneva <https://www.dw.com/ev/farming-without-glyphosate-how-would-that-work/a-41104393>
- Sidorov MI, GH Vanicovici, V Coltun and others 2006 *Agriculture*. Bălți University Press (Romanian)
- Six J, ET Elliott & K Paustian 1999 Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal* 63, 1350-1358
- Six J, ET Elliott & K Paustian 2000 Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 2099-2103
- Soane BD, BC Ball, J Arvidsson and others 2012 No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research* 118, 66-87

- Stagnari F, S Ramazzotti & M Pisante 2009 *Conservation agriculture. A different approach for crop production through sustainable soil and water management: A review*. Springer Science and Business Media Doi: 10.1007/978-1-4020-9654-9-5.
- Triboi E & A-M Triboi-Blondel 2014 Towards sustainable, self-supporting agriculture. Biological nitrogen factories as a key for future cropping systems. 329-242 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht
- Triplett GB & WA Dick 2008 No-tillage crop production: A revolution in agriculture. *Agronomy Journal* 100, 5153-5164
- Turmel M-S, A Speretti, F Baudron and others 2015 Crop residue management and soil health: a systems analysis. *Agricultural Systems* 134, 6-16
- Vanden Bygaart AJ, EG Gregorich & DA Angers 2003 Influence of agricultural management on soil organic carbon: a compendium and assessment of Canadian studies. *Canadian Journal of Soil Science* 83, 363-380
- Virgil (Publius Vergilius Maro) 29 BC *The Georgics, Book I*. Translated by L Wilkinson, B Radice (editor), Penguin Classics 1982, London
- Wick A 2017 *Using soil health to improve trafficability*. <http://www.agweek.com/news/north-dakota-4346315-using-soil-health-improve-trafficability>
- Winsor S 2019 Diverse rotation builds durable soils. Listen to the Land. *Progressive Farmer*, ST-4 – ST-8
- Вильямс В.Р. Избранные труды, тома 5-10. М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. 1950-1952.
- Голдштайн В., Боинчан Б. П. Устойчивое ведение хозяйств в лесостепных условиях России, Украины и Молдовы. М.: ЭкоНива, 2000. 267 с.
- Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь. 1892 г. // Собрание сочинений. Под редакцией и с предисловием В. Р. Вильямса, З.С. Филипповича. М.- Л.: Сельхозгиз, 1936.
- Измаильский А. А. Как высохла наша степь. Предварительное сообщение о результатах исследований влажности почвы в Полтавской губернии в 1886–1893 гг. М.-Л.: ОГИЗ, Сельхозгиз, 1937. 76 с.
- Костычев П. А. Руководство по земледелию. М.: Наркомзем, Новая деревня. 1922.
- Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н. Органическое вещество пахотных нечерноземных почв. М.: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2004. 630 с.
- Лыков А. М., Кауричев И. С., Сидоров М. И., Глазовская М. А. Современные системы земледелия: послесловие после обсуждения. //Земледелие, № 10, 1990, с. 24–29.
- Лыков А. М., Макаров П. И., Рассадин А. И. Методологические основы теории обработки почвы в интенсивном земледелии. //Земледелие, № 6, 1982, с. 14–17.
- Мишустин Е. Н., Теппер Э. З. Влияние севооборота, монокультуры и удобрения на состав почвенной микрофлоры. // Известия ТСХА, № 6, 1963, с. 85–92.
- Овсинский И. И. Новая система земледелия. (Перевод с польского). 1909 г.
- Сидоров М. И. Плодородие и обработка почвы. Воронеж: Центрально-Черноземное книжное издательство. 1981. 96 с.
- Сидоров М.И., Зезюков Н.И. Земледелие на черноземах (теоретические основы): Учебное пособие. Воронеж: Изд-во Воронеж.ун-та, 1992. 184с
- Соколовский А. Р. Сельскохозяйственное почвоведение. М.: Сельхозгиз. 1956. 335 с.
- Советов А. О системах земледелия. Санкт-Петербург. Типография товарищества «Общественная польза» 1867. 286 с.
- Трубецкой П. П. Восемнадцатый отчет Плотнянской сельскохозяйственной опытной станции за 1912 г. Императорское общество сельского хозяйства юга России. Одесса, 1913 г.
- Чебасов П.Т. Обработка почвы под полевые культуры. Кишинев: Cartea Moldoveneasca, 1982.

ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВЫ, УДОБРЕНИЕ ПОЧВЫ И КРУГОВОРОТ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

*Сеятель вышел, чтобы посеять семена свои; и когда он их
сеял, некоторые упали на дорогу;
и они были затоптаны, и птицы проглотили их.
Некоторые упали на каменистую землю; и как только они
появились, они высохли,
потому что им не хватало влаги.
И некоторые упали среди колючек; и колючки выросли
с ними и задушили их.
А другие упали на добрую землю и взошли, и принесли
стократные плоды.*

Luke 8, 4-8

Аннотация. Самое замечательное, что есть в черноземе – производить урожай на удобренных полях. В длительных опытах на типичном черноземе в Бельцкой степи средняя урожайность озимой пшеницы была на уровне 4 т/га, что эквивалентно лучшим показателям, достигнутым в Европе до 1960-х годов, это в два раза выше, чем средний урожай по России за последние десятилетия, и очень хороший урожай на засушливых землях в любом месте. Даже после более чем столетия каторжных работ эта земля все еще остается лучшей в мире. Урожайность увеличилась вместе с введением различных систем удобрения, но выровнялась за последние 20-25 лет. В севообороте сахарная свекла и озимая пшеница хорошо реагируют на удобрения, кукуруза и подсолнечник почти не реагируют; и чем больше минеральных удобрений применяется, тем меньше эффективность использования питательных веществ. Дополнительные урожаи, полученные даже из-за низких норм внесения удобрений, даже по наиболее отзывчивым культурам, не окупаются затратами на их выращивание. Нам нужно найти более эффективные способы использования минеральных удобрений, или найти им альтернативу.

Сторонники получения все более высоких урожаев закрывали глаза на снижение плодородия почвы. Среднегодовые потери почвенного органического углерода из типичного чернозема в течение 30 лет в результате минерализации органического вещества почвы при бессменном посеве озимой пшеницы и кукурузы составляли 0,38–0,42 т/га, а при севообороте – 0,26–0,29 т/га. Большие поступления питательных веществ от минеральных удобрений не компенсируют такие потери, и это ограничит будущую устойчивую интенсификацию сельского хозяйства.

При хорошем, разнообразном севообороте, даже при оптимальном использовании навоза и удобрений, доля собственного плодородия почвы в формировании урожая остается очень высокой: 83-89% для озимой пшеницы, 64-85% для сахарной свеклы, 85-96% для кукурузы и 75-83% для подсолнечника. Там, где применяется навоз крупного рогатого скота, дополнительные минеральные удобрения неэффективны, поэтому их стоимость и воздействие на окружающую среду можно снизить, или отказаться от них. По сравнению с бессменным выращиванием культур и коротким севооборотом более разнообразные севообороты увеличивают эффективность использования питательных веществ и воды. Интеграция растениеводства и животноводства в севообороте, включающем многолетние бобовые и злаковые травы, позволяет эффективно использовать кормовые культуры и побочные продукты основных культур. В свою очередь, домашний скот возвращает навоз на поля, компенсируя питательные вещества, поглощаемые сельскохозяйственными культурами, и органическое вещество, разрушаемое в результате минерализации.

Многолетние бобовые и злаковые травы противостоят засухе, забирая воду из глубины почвы. Пополнение почвенной влаги в зимний период происходит больше в севообороте, чем при бессменной культуре, и намного больше, чем у черного пара, который следует избегать из-за неэффективного потребления воды и разрушительного воздействия на органическое вещество почвы.

Ключевые слова: плодородие почвы, удобрения, реакция сельскохозяйственных культур, минерализация органического вещества почвы, эффективность использования питательных веществ и воды, севооборот, бессменная культура, многолетние бобовые культуры.

7.1. Введение

Между 1950 и концом 1960-х годов урожай основных культур увеличился в три раза благодаря сочетанию новых сортов сельскохозяйственных культур и гибридов, применению минеральных удобрений, гербицидов и пестицидов, расширению орошения, замене натурального хозяйства более крупными коммерческими фермами. В последние десятилетия урожайность выровнялась или даже снизилась. К 2050 году производство снова должно будет увеличиться вдвое. Продолжение в том же духе, похоже, не принесет ничего, кроме побочного экологического ущерба.

В период расцвета новых сортов сельскохозяйственных культур и промышленных инпуты (ресурсы) увеличение урожайности скрывало реальное ухудшение плодородия почвы, что является серьезным фактором из-за большой доли плодородия почвы в формировании урожая. На неудобренных землях эта доля составляет 100%; при различных системах удобрения она составляет 83-89% для озимой пшеницы, 64-89% для сахарной свеклы, 85-96% для кукурузы на зерно и 75-84% для подсолнечника. Устойчивость земледелия зависит от восстановления оптимального уровня плодородия почвы, что может быть достигнуто путем соблюдения севооборота и возврата энергии, а также питательных веществ в почву в виде навоза.

Диверсифицированные севообороты используют воду и питательные вещества более эффективно, чем севообороты с короткой ротацией и бессменные однолетние культуры, но более высокие нормы минеральных удобрений не компенсируют потери органического вещества почвы в результате минерализации. С другой стороны, интеграция растениеводства и животноводства позволяет продуктивно использовать кормовые культуры и побочные продукты основных культур, а также создает навоз на ферме, необходимый как для компенсации питательных веществ, так и энергии, затрачиваемой на формирование урожая. Таким образом, круговорот питательных веществ может уменьшить или заменить дорогостоящие промышленные инпуты.

Различные культуры по-разному реагируют на удобрения, но при внесении удобрений в контексте всего севооборота может учитываться способность различных культур использовать как непосредственно внесенные удобрения, так и остаточный эффект удобрений, применяемых под предшествующие культуры в севообороте. Долгосрочная стратегия использования питательных веществ должна заключаться в удобрении всей системы севооборота, а не отдельных культур. Мы уже показали, что на черноземных почвах в условиях диверсифицированного севооборота внесение минеральных удобрений дополнительно к навозу, внесенному соответствующим образом, является агрономически и финансово неэффективным. Недостаточная реакция некоторых культур на удобрение должна быть выяснена будущими исследованиями, в частности, способность корневых систем устанавливать симбиотическое взаимодействие с микоризой при различных системах удобрения. Мы уже должны искать более эффективные способы использования минеральных удобрений или найти им альтернативу.

7.2. Плодородие почвы и удобрение почвы

История сельского хозяйства – это история восстановления плодородия почвы (Вильямс, 1940), а интегральным показателем плодородия почвы является органическое вещество почвы (Лыков, 2004). Только плодородные почвы, находящиеся под устойчивым менеджментом, могут обеспечить *полный спектр экосистемных услуг*: предоставление услуг, включая производство продуктов питания, волокна, древесины и среды обитания для генетических ресурсов; *регулирующие услуги*, включая снабжение и очистку пресной воды, а также смягчение последствий эрозии, наводнений, засухи и парникового эффекта; *вспомогательные услуги*, включая почвообразование, круговорот питательных веществ и воды, а также адаптацию к стихийным бедствиям; и *культурные услуги*, такие как поддержание ландшафтов, продвижение духовных и общественных ценностей через отдых и вдохновение искусства, архитектуры и фольклора (Оценка экосистем на пороге тысячелетия, 2005). Многое ожидается от наших почв.

В главе 5 обсуждался поворотный момент в истории, отмеченный введением Норфолкского четырехпольного севооборота в последней четверти 18-го века в Англии. Следующим поворотным моментом стала публикация книги Либиха «Химия в приложении к земледелию и физиологии растений» в 1840 году. В то время преобладающее мнение о питании растений заключалось в том, что растения получают все свое питание из гумуса – как изложено в руководстве Тэера (*Thaer*,

Grundsätze der rationellen Landwirtschaft), опубликованном в 1809-12 гг., а также в книге «Элементы сельскохозяйственной химии» Дейви, опубликованной в 1813 г. (*Davy, Elements of agricultural chemistry*). Либих раскритиковал теорию гумуса, указав, что растения имеют неисчерпаемый запас углерода из воздуха, водорода и кислорода из воды, азота из аммиака и другие важные элементы от выветривания минералов в почве. Теория минерального питания Либиха продвигала минеральные удобрения в качестве заменителя навоза и компоста, и его практические открытия были подхвачены химической промышленностью для производства дешевых и удобных удобрений, которые значительно упростили сельское хозяйство и сделали его более эффективным и продуктивным.

Наследие Либиха и сегодня с нами, но осталось почти незамеченным то, что он полностью пересмотрел свою концепцию в своей последней книге «Естественные законы земледелия» (*The natural laws of husbandry*), опубликованной в 1863 году. Позже он понял, как важно проверять результаты лабораторных работ на ферме, и он раскритиковал Левиса и Гилберта за их попытки найти формулу, которая могла бы восстановить первоначальную производительную силу полей: по его мнению, такой формулы не существует. Например, на почве, испытывающей клевероутомление, никакой обычный навоз, будь то искусственный или натуральный, не может помочь. Вопреки своей собственной теории минерального питания, Либих теперь утверждал, что только севооборот с разнообразием культур и щедрым внесением навоза на ферме может восстановить плодородие почвы. Чем больше он становился агрономом, тем больше понимал, что лаборатория может служить сельскому хозяйству, но не должна диктовать.

Он писал: «Единственным средством определения количества доступных питательных веществ является не химический анализ, а сами посевы» (см. главу 5). Он пришел к выводу, что урожайность определяется не только содержанием азота в почве; действительно, нет сильной корреляции между урожайностью и общим азотом – как доказано многолетними полевыми опытами в различных частях мира (*Albrecht, 19384; Boincean и др., 2014; Powlson и др., 2014*). Но это не значит, что мы не должны восстанавливать запасы азота в почве. Либих также отмечал, что обработка почвы не добавляет питательные вещества в почву, но делает имеющиеся питательные вещества доступными для питания будущих сельскохозяйственных культур. В настоящее время нулевая обработка почвы стала обычным явлением, но нулевая обработка почвы в ослабленном севообороте, даже с растительными остатками урожая и минеральными удобрениями, не может восстановить плодородие почвы, если не будет обеспечено достаточное количество навоза или другого органического удобрения.

Показательно, что Либих писал: «Нет такой профессии, которая для успешной практики требует большей степени знаний, чем сельское хозяйство, и нет такой профессии, в которой реального невежества больше». У него также были идеи о связи между качеством пищи и здоровьем человека, например о пользе цельнозернового хлеба по сравнению с белым хлебом – из-за большего содержания питательных элементов в нем. В настоящее время последняя книга Либиха почти неизвестна, но идеи, которые он развил в отношении плодородия почв, удобрения почв и круговорота питательных веществ, соответствуют биологическим и экологическим темам, позднее разработанным Докучаевым (1883), Альбрехтом

(*Albrecht*, 1938), Вильямсом (1940), Костычевым. (1940), Ховардом (*Howard*, 1943), Бельфур (*Balfour*, 1943), Виноградским (1952), Красильниковым (1958), Пфайфер (*Pfeiffer*, 1983), Леопольдом (*Leopold* 1987) и другими.

В «Сельскохозяйственном завете» сэра Альберта Ховарда (*Howard*, 1943) утверждается, что болезни сельскохозяйственных культур и болезни почвы (эрозия) являются результатом неправильного менеджмента: вместо того чтобы избегать ошибок, мы пытаемся контролировать последствия. Он считал, что насекомые, грибы и вирусы являются не причиной болезней, а следствием чего-то неправильного в системе земледелия; он хотел предотвратить вредителей и болезни и предотвратить эрозию почвы, а не просто смягчить их, а тем более – бороться с ними. И то, и другое может быть достигнуто за счет повышения плодородия почвы, и регулярные поставки свежего органического вещества из навоза – лучший способ сделать это. Закон возврата означает, что мы должны возвращать не только минеральные питательные вещества в почву, но также и энергию в форме свежего органического вещества. Кроме того, в богатых гумусом почвах корневые системы связаны с микоризными грибами, которые увеличивают способность сельскохозяйственных культур отразить инфекцию и поглощать питательные вещества из менее растворимых форм в почве.

Ховард приводил доводы в пользу смешанного земледелия: индустриализация была неправильным направлением для сельского хозяйства из-за менталитета NPK и необоснованного пренебрежения здоровьем почвы. Как и Альбрехт (1979), он видел связь со здоровьем всей пищевой цепочки: почва – культуры – животные – люди. В этом он нашел поддержку в книге «Живая почва», изданной леди Евой Бельфор (*Balfour*, 1948). Леди Бельфор провела первый длительный полевой опыт, сравнивая органическое земледелие с химически зависимым земледелием в Хоули в Саффолке. Она указала на ошибку приравнивания роста урожайности к увеличению плодородия почвы: это не одно и то же. Плодородие почвы включает в себя не только внутренние свойства почвы, что может привести к повышению продуктивности; но и жизнеспособность почвы – здоровье почвы, которое является таким же, как здоровье сельскохозяйственных культур, животных и людей. Таково было также мнение основателя экологии Эрнста Геккеля (*Ernst Haeckel*, 1834-1919). В наше время Джеффри Рейнер и Тим Лэнг из Центра продовольственной политики городского Университета в Лондоне считают, что качество продуктов питания является ключом к общественному здравоохранению (*Rayner and Lang*, 2012).

В конечном результате менталитет NPK преобладал в течение полувека, пренебрегая ролью земляных червей, микоризы и биологической способностью бобовых фиксировать азот из атмосферы. Разделение национальных обязанностей по выращиванию продуктов питания (министерство сельского хозяйства), здравоохранения (министерство здравоохранения) и охране окружающей среды (министерство охраны окружающей среды, появившееся относительно недавно), без какой-либо общей концепции, не помогает находить решения для многих дублирующих друг друга вопросов. Аналогичным образом, дробление науки на отдельные дисциплины без обобщения их результатов не отвечает потребностям производителей на уровне фермерских хозяйств, где биологическая природа фундаментальных проблем сельского хозяйства не всегда совместима даже с лучшими достижениями сельскохозяйственного машиностроения и химической

промышленности. Сейчас, как никогда, земледелие нуждается не столько в технологическом подходе, сколько в системном подходе.

Намного раньше громкие призывы к такому целостному подходу прозвучали в российских школах земледелия и почвоведения. Докучаев (1883) подчеркивал необходимость изучения не только отдельных природных тел и природных явлений, но и взаимосвязи между живой и неживой природой, между растительным, животным и минеральным царствами. Костычев в книге «Почвы черноземных областей России» (1949) признал степную растительность основным фактором формирования чернозема, поэтому изменения растительности, особенно ее корневой системы, будут отражены в изменении органического вещества почвы; и он описал разрушительное воздействие вспашки и минеральных удобрений на разнообразие биоты в почве. Вильямс (1950) приводил доводы в пользу обязательного выращивания смесей многолетних бобовых и злаковых трав для восстановления плодородия почвы; выступая против него, Прянишников (1953, 1965а, б), будучи убежденным сторонником минеральных удобрений, не сбрасывал со счетов роль многолетних бобовых. Между этими двумя академиками завязалась бурная дискуссия, в итоге которой победили минеральные удобрения.

Голоса почвенных микробиологов также остались без внимания. Еще в 1927 году Виноградский предупредил, что внесение азота из минеральных удобрений остановит биологическую фиксацию азота в почве. Впоследствии (1952) он предложил разъединить почвенные микроорганизмы в зимогены и автохтоны. Зимогены ответственны за минерализацию лабильной фракции органического вещества почвы; когда оно исчерпано, микроорганизмы начинают разрушать более стабильные фракции ОВП, поэтому запасы свежего органического вещества следует регулярно пополнять. Красильников (1958) утверждал, что польза от навоза зависит не только от питательных веществ, которые он содержит, но и от биологически активных продуктов микробного метаболизма. Хорошо зная роль микоризных грибов и бактерий, ответственных за биологическую фиксацию азота, он сравнил биоту ризосферы с пищеварительной системой животных; грибы и бактерии являются посредниками между корнями сельскохозяйственных культур и питательными веществами в почве, так что, например, грибы могут поглощать до 90% внесенного фосфора; и он объяснял иммунитет культур к болезням способностью корневой системы поглощать антибиотики из почвы.

7.2.1. Потребление и сохранение почвенной воды в севооборотах

В работе «Почва и люди», в Ежегоднике по сельскому хозяйству Департамента сельского хозяйства США за 1938 год, Вильям Альбрехт (*William Albrecht*) рассказал, что за 60 лет распашки почвы было уничтожено более трети гумуса, унаследованного от девственных почв прерий. Это сказалось на питании растений: Кассман и Харвуд (*Cassman and Harwood*, 1995) обнаружили неослабевающую утрату способности почвы к минерализации азота, что ведет к снижению урожайности даже при более высоких дозах минеральных удобрений.

Без достаточного количества азота запасы почвенного углерода не могут быть сохранены, и наоборот. Альбрехт (*Albrecht*) считал поддержание органических

веществ в почве *национальной обязанностью*; он подчеркнул роль многолетних бобовых культур в севообороте как наиболее эффективный инструмент для усвоения азота, наиболее эффективный способ для лучшего усвоения фосфора из подпочвы, идеальный барьер против эрозии почвы... И он увидел важную роль посева культур для задержания почвы в сборе воды для уменьшения риска засухи.

Значение многолетних бобовых и злаковых трав в севообороте было предметом споров в СССР. В 1960-х годах генеральный секретарь Коммунистической партии Никита Хрущев фактически запретил их выращивание на том основании, что они были малоурожайными и высыхали. Профессор Иосиф Либерштейн, отвечавший в то время за многолетние полевые опыты в Бельцах, вспоминает, что само наличие многолетних бобовых и злаковых трав было исключено из официальных отчетов; они были официально вновь включены в 1964 году, после отставки Хрущева. В таблице 7.1 представлены данные этих полевых опытов по накоплению и потреблению почвенной воды в севооборотах с многолетними бобовыми культурами и без них, бессменными посевами однолетних растений и черным паром. В течение десятилетия 2005 – 2015 гг. среднее потребление почвенной воды в период вегетации озимой пшеницы и сахарной свеклы варьировало от 166,3 до 199,2 мм по сравнению с 94,2-101,5 мм для кукурузы на зерно. Бессменные озимая пшеница и кукуруза на зерно потребляли столько же, сколько те же культуры, выращиваемые в севообороте. Кукуруза черпает влагу в основном из самого верхнего метра почвы, тогда как озимая пшеница черпает больше из подпочвы. Люцерна второго года потребляла столько же воды, сколько пшеница и сахарная свекла. Наименьшее потребление почвенной воды было под черным паром: 61,8 мм, но это было совершенно непродуктивно.

В засушливые годы кукуруза и люцерна в севообороте почти удваивали свое потребление воды, в то же время забирая воду в тех же пропорциях из слоев почвы 0-100 см и 100-200 см (таблица 7.2). Сахарная свекла потребляла меньше воды в севооборотах N4 и N5, особенно в севообороте N4, но в N1 и N5 доля почвенной воды, взятой из слоя 100-200 см, увеличилась до 70-80%. Озимая пшеница потребляла намного меньше воды в севооборотах N1 и N4 (оба без многолетних бобовых), но больше в севообороте N5 (с многолетними бобовыми), где также увеличилась доля почвенной воды, взятой из слоя 100-200 см. Бессменная пшеница и кукуруза сильно пострадали, потребляя намного меньше воды и вытягивая ее в основном из верхнего метра почвы. Наибольшее и совершенно непродуктивное потребление воды во время засухи было обусловлено черным паром: потребление увеличилось в три раза по сравнению со средним показателем 2005–2015 годов (с 61,8 до 202,7 мм) и в четыре раза по сравнению со слоем почвы 100–200 см (с 24,9 до 92,0 мм).

В таблице 7.3 представлены урожаи различных культур в севооборотах и в бессменных посевах: в севообороте N5, который включал многолетние бобовые культуры, средние урожаи сахарной свеклы и кукурузы были выше, чем в других севооборотах без многолетних бобовых культур; особенно в засушливые годы. Мы считаем, что польза от многолетних бобовых – не только на один год, но и на многие последующие годы. Они потребляют много воды, а дефицит восполняется за счет накопления в течение осени и зимы (таблицы 7.4 и 7.5).

Таблица 7.1. Потребление воды в почве в течение вегетационного периода различными севооборотами, бессменными посевами озимой пшеницы и кукурузы на зерно, а также черным паром (мм), НИИПК *Seleçtia*, среднее за 2005-2015 гг.

Культуры и черный пар	Севообороты						Бессменные культуры	
	N1 (70% пропашные культуры)		N4 (60% пропашные культуры)		N5 (40% пропашные культуры)		0-200 см	Включая 100-200 см
	0-200 см	Включая 100-200 см	0-200 см	Включая 100-200 см	0-200 см	Включая 100-200 см		
Озимая пшеница	166.3	86/52%	199.2	99.6/50%	198.3	85.4/43%	176.3	70.4/40%
Сахарная свекла	174.5	93.8/54%	167.3	67.5/40%	197.2	95.3/48%	–	–
Кукуруза на зерно	94.2	32/34%	91.8	26.2/29%	101.5	37.8/37%	105.1	48.7/46%
Люцерна, второй год жизни	–	–			183.3	93.1/51%		
Черный пар	–	–					61.8	24.9/40%

Таблица 7.3. Урожайность культур в разных севооборотах и в бессменных культурах (т/га), среднее за 2000-2015 гг., и в условиях засухи; НИИПК *Selectia*

Культуры	Севообороты			Бессменные культуры
	N1 (70% пропашные культуры)	N4 (60% пропашные культуры)	N5 (40% пропашные культуры)	
Озимая пшеница	4.15	4.57	4.41	2.81
Сахарная культура	37.7	35.7	40.8	-
Кукуруза на зерно	5.63	5.84	6.15	5.45
<i>В засушливые годы</i>				
Озимая пшеница (2012)	3.0	3.65	4.30	2.5
Сахарная свекла (2012)	33.0	22.0	41.7	-
Кукуруза на зерно (2015)	2.92	3.91	4.50	0

Таблица 7.4. Пополнение почвенной воды под сахарной свеклой в период осень-зима-весна при различных севооборотах и бессменной озимой пшенице (мм), среднее за 2006-2015 годы и в условиях засухи, НИИПК *Selectia*

Слои почвы (см)	Севообороты			Бессменная озимая пшеница
	N1	N4	N5	
0-100	77.9/51%	86.1/55%	92.6/57%	103.4/59%
0-200	153.5	157.9	163.8	176.9
<i>В условиях засухи (2015)</i>				
0-100	45.3/38%	39.2/19%	99.9/44%	28.7/23%
0-200	118.6	207.5	227	127.6

Пополнение почвенной воды под сахарной свеклой после пшеницы было почти таким же, как и в среднем за 10 лет для бессменной озимой пшеницы, но при засухе 2015 года подпитка была выше для слоев почвы как 0-100 см, так и 100-200 см под севооборотом с многолетними бобовыми, и также в севообороте N4 с более высокими дозами навоза. В то же время среднее пополнение под озимой пшеницей после уборки люцерны на третьем году жизни после первого укоса составило 204,5 мм в верхних двух метрах – значительно больше, чем под сахарной свеклой после озимой пшеницы. В таблице 7.5 представлено пополнение почвенной воды под кукурузой на зерно в период осень-зима-весна после уборки сахарной свеклы в различных севооборотах, под бессменной кукурузой на зерно и черным паром. Пополнение было самым высоким в севообороте N5 (с люцерной), особенно во время засухи 2015 года. В условиях засухи накопление почвенной воды было значительно ниже при бессменной кукурузе по сравнению с севооборотом N5. Кроме

Таблица 7.5. Пополнение почвенной влаги под кукурузой на зерно в период осень-зима-весна в различных севооборотах, бессменной кукурузе и в условиях черного пара (мм), среднее за 2006-2015 годы и в условиях засухи

Слои почвы (см)	Севообороты			Бессменные посевы и черный пар	
	N1	N4	N5	Кукуруза на зерно	Черный пар
0-100	61.1/50%	77.4/68%	76.9/55%	53.9/51%	28.8/58%
0-200	123.2	114.1	139.5	105.6	50.0
<i>В условиях засухи (2015)</i>					
0-100	118.5/66%	115/74%	139.9/56%	66.1/63%	38.3/80%
0-200	179.3	156.0	250.5	105.7	48

того, корневая система бессменной кукурузы ограничена верхним метром почвы, а уязвимость урожаев при бессменных однолетних культурах обусловлена меньшим пополнением почвенной воды и меньшей способностью использовать воду из более глубоких слоев почвы. Наименьшее накопление почвенной воды происходило под черным паром: в среднем 48 мм за десять лет и 50 мм в 2015 году. Единственный урок, который мы можем извлечь из этого, заключается в том, что черный пар не следует практиковать, учитывая также и многие другие его недостатки.

Экспериментальные севообороты и бессменные однолетние культуры получают разное количество питательных веществ с навозом и с минеральными удобрениями и, следовательно, выносят неодинаковое количество питательных веществ при уборке. В таблице 7.6 представлены соотношения между количеством питательных веществ, потребляемых общей надземной биомассой, и вносимых питательных веществ. Доля внесенных NPK в общем количестве NPK, извлеченных в севооборотах N5 и N4, составила 38 и 57% соответственно; для бессменных озимой пшеницы и кукурузы на зерно этот показатель составил соответственно 89 и 45% процентов. Исключением является севооборот N1 (с 70% пропашных культур), поскольку внесенное количество NPK было выше, чем количество NPK, вынесенное культурами. Однако компенсация питательных веществ, вынесенных сельскохозяйственными культурами, не восполняет потерю энергии в результате минерализации почвенного органического вещества для формирования урожая. Недостаточное поступление углерода из растительных остатков и навоза привело к потерям 7,8-8,6 тС/га в севооборотах и потерям 10,0-11,0 тС/га в бессменных посевах пшеницы и кукурузы: соответственно 10-11 и 13-14% от первоначальных запасов почвенного органического углерода (таблица 7.7).

Ежегодные потери органического углерода в почве за 30 лет составили 0,26–0,29 т/га в севооборотах и 0,38-0,42 т/га в бессменных посевах озимой пшеницы и кукурузы на зерно. Включение многолетних бобовых и злаковых трав в севооборот является одним из лучших способов компенсации ежегодных потерь органического вещества почвы. Несмотря на это, очевидно, что в севообороте N5

Таблица 7.6. Соотношение питательных веществ, потребленных надземной биомассой и вносимых с навозом и удобрениями в севооборотах и в бесменных культурах (тонн активного вещества NPK/га/год), среднее за 1962-1991 гг., НИИПК *Seleçtia*.

Севообороты, бесменные культуры	Доля пропашных культур в севооборотах, %	Общая надземная биомасса, т	Питательные вещества (NPK), вынесенные урожаем	Внесено NPK с навозом и удобрениями	Отношение вынесенные питательные вещества: внесенные питательные вещества	Доля внесенных NPK к количеству, вынесенному растениями, %
Севообороты	40 (N5)	9.8	0.50	0.19	2.6	38
	60 (N4)	12.4	0.56	0.32	1.7	57
	70 (N1)	11.7	0.51	0.76	0.7	149
Бесменные культуры*	Озимая пшеница	10.1	0.35	0.31	1.1	89
	Кукуруза на зерно	16.6	0.67	0.30	2.2	45

*среднее за 1965-1991

Таблица 7.7. Годовое внесение углерода и ежегодные потери органического углерода почвой в севооборотах, при бесменной культуре и под черным паром (т/га), 1962-1991 гг.

Севообороты, бесменные культуры	Посевы, доля пропашных культур в севооборотах, %	Ежегодное поступление С с растительными остатками и навозом	Изменение запасов углерода относительно первоначальных запасов в 1962 г. (78,6 т/га)		Ежегодные потери почвенного органического углерода
			т/га	%	
Севообороты	40	25.0	7.8	9.9	0.26
	60	30.0	8.6	10.9	0.29
	70	26.9	8.6	10.9	0.29
Бесменные культуры*	Озимая пшеница	25.3	10.0	12.7	0.38
	Кукуруза на зерно	32.9	11.0	14.0	0.42

*среднее за 1965-1991

включение 30 процентов многолетних бобовых культур, дополненных 4 тоннами навоза на гектар севооборота, недостаточно для поддержания запасов органического углерода в почве; даже 12 т/га навоза, применяемого в севообороте N4 (с 60% пропашных культур, но без люцерны) недостаточно. Необходимо вносить больше или же найти другие источники органического вещества, чтобы компенсировать потери органического вещества в почве в результате минерализации.

7.2.2. Урожайность растений на типичных черноземах при различных системах удобрения

Начиная с 1971 года в НИИПК *Selectia* в Бельцах проводились испытания различных доз и сочетаний удобрений на тяжелосуглинистом *Типичном черноземе*. Начальное содержимое ОВП составляло 4,35-5,08%, общий азот – 0,24-0,26%, фосфора – 0,1-0,12% и калия – 1,2-1,4%; водный pH был равен 6,6-7,1. Были использованы различные системы удобрения (таблица 7.8):

- неудобренный контроль;
- минеральные удобрения (NPK 1, 2 и 3: 75, 130 и 175 кг действующего вещества/на 1 га севооборотной площади);
- органические + минеральные удобрения (NPK + 15 т навоза на гектар севооборота)
- органическое удобрение (15 т навоза на гектар севооборота).

Для большинства культур удобрения вносятся осенью, во время основной обработки почвы. Озимая пшеница является исключением: половина дозы применяется осенью, а другая половина – весной. Навоз разбрасывают осенью: под сахарную свеклу – 60 т/га и под подсолнечник – 30 т/га, что составляет 15 т на га севооборота. Опыт включает 4 повторности. Каждая делянка – 242 кв. м (5,6 м x 43,2 м).

Рисунки 7.1-7.8 показывают тенденцию урожайности разных культур в севообороте и продуктивности всего севооборота. Самое замечательное – это урожайность на неудобренных делянках. Среднее значение урожая озимой пшеницы составило 4 т/га, что эквивалентно лучшим урожаям, достигнутым где-либо в Западной Европе до 1960-х годов, вдвое выше среднего показателя по России за последние десятилетия и очень хороших урожаев на засушливых землях в любом месте. Даже после столетия каторжных работ эта земля все еще остается лучшей в мире. За последние 20-25 лет первоначальное увеличение урожайности за счет навоза и удобрений выровнялось, но реакция на удобрения была разной для разных культур. Озимая пшеница и сахарная свекла реагируют больше, чем кукуруза на зерно и подсолнечник. Яровой ячмень и смесь овса и вики эффективно использовали остаточный эффект удобрений, внесенных под предыдущие культуры в севообороте. Доля плодородия почвы в формировании урожая (процентная разница в урожайности между удобренными и неудобренными делянками) была выше для тех культур, которые менее отзывчивы на внесение удобрения, и ниже для культур с более высокой отзывчивостью.

Урожайность озимой пшеницы по отношению к контролю была выше на всех системах удобрения (рис. 7.1): прирост составлял 0,44–0,64 т/га (11–17%), но по-

следствие навоза, использованного под предыдущие культуры в севообороте, составляло 0,53 т/га (14%). Следовательно, внесение минеральных удобрений после внесенного навоза неоправданно. Такая же ситуация отмечена для сахарной свеклы (рис. 7.2): все системы удобрения повысили урожайность по сравнению с контролем. Дополнительная урожайность составила 3,75–9,95 т/га (15–36%), при этом наименее значимое увеличение было на делянках, где были внесены только минеральные удобрения: 3,75–5,45 т/га (15–22%). На делянках, где внесли 10 и 15 тонн навоза на гектар севооборота, получены дополнительные 5,9–7,21 т/га (24–29%) и 7,16–8,98 т/га (29–36%) соответственно. Дополнительная урожайность на делянках, удобренных навозом, по сравнению с неудобренными составила 7,88 т/га (32%), поэтому, опять же, внесение минеральных удобрений в дополнение к навозу не оправданно.

Кукуруза на зерно (рис. 7.3) реагировала только на самые низкие дозы минеральных удобрений и остаточное действие навоза: 0,61–0,75 т/га (10–15%) и 0,34 т/га (6%) соответственно. Более высокие дозы минеральных удобрений дали меньшую урожайность. Кукуруза почти не реагирует на удобрение. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы полностью понять этот эффект, но способность корневых систем устанавливать симбиотическое взаимодействие с микоризой снижается при удобрении (*Gianinazzi* и др. 2010; *Altieri*, 1999; *Brundrett*, 1991; *Näsholm* и др. 2009). Наряду с поглощением питательных веществ, микоризы улучшают структуру почвы и уменьшают заражение вредителями и болезнями; способность корневых систем, связанных с микоризными грибами, использовать органические соединения для питания сельскохозяйственных культур может открыть новые перспективы для сельскохозяйственной практики.

Все системы удобрения увеличили урожай подсолнечника по сравнению с контролем (рис. 7.4): прибавка урожая при этом составила от 0,26 до 0,39 т/га (17–25%), дополнительная урожайность на делянках с остаточным и прямым действием навоза составляла 0,37 т/га (20%). Как и в случае с кукурузой, необходимы дополнительные исследования, чтобы понять эту слабую реакцию подсолнечника на удобрение.

Как вико-овсяная смесь, так и яровой ячмень эффективно использовали остаточный эффект навоза и удобрений в севообороте; оба варианта показали впечатляющее увеличение урожайности по сравнению с неудобренными делянками и, опять же, остаточный эффект навоза был таким же, как и в варианте с навозом и дополнительным минеральным удобрением.

На рис. 7.8 показана продуктивность всего севооборота при различных системах удобрения: наименее продуктивными были те делянки, на которых раздельно были внесены две более низкие дозы минеральных удобрений; третья, самая высокая доза минеральных удобрений обеспечила тот же уровень продуктивности, что и внесение минеральных удобрений вместе с навозом. Тем не менее, вынос питательных веществ из минеральных удобрений, был наибольшим при применении их наименьшей дозы вместе с навозом (рис. 7.9).

Данные, полученные метеорологической станцией НИИПК *Selecția* (рис. 7.10), показывают устойчивую тенденцию к повышению температуры в период 1980–1985 гг. В то же время, заметна тенденция к уменьшению количества осадков.

Таблица 7.9. Урожайность культур при различных системах удобрения в севообороте, НИИПК *Seleçtia*, среднее за 2011-2016 гг.

Варианты	Вико-овсяная смесь на зеленую массу			Озимая пшеница			Сахарная свекла			Кукуруза на зерно			Яровой ячмень			Подсолнечник		
	т/га	Изме- нение	%	т/га	Изме- нение	%	т/га	Из- мене- ние	%	т/га	Изме- нение	%	т/га	Изме- нение	%	т/га	Из- мене- ние	%
Неудо- брённый	13.64	-	-	3.85	-	-	24.85	-	-	6.13	-	-	2.14	-	-	1.57	-	-
NPК1	16.46	2.82	20.7	4.49	0.64	16.6	28.60	3.75	15.1	7.04	0.91	14.8	3.09	0.95	44.1	1.84	0.27	17.2
NPК2	17.39	3.75	27.5	4.34	0.49	12.7	29.65	4.80	19.3	6.94	0.82	13.4	3.24	1.1	51.4	1.90	0.33	21.0
NPК3	19.46	5.82	42.7	4.49	0.64	16.6	30.30	5.45	21.9	6.39	0.26	4.2	3.30	1.16	54.2	1.90	0.33	21.0
NPК1 + 10т/га	19.37	5.73	39.8	4.43	0.58	15.1	30.84	5.99	24.1	6.74	0.61	10.0	4.43	1.29	60.3	1.96	0.39	24.8
NPК2 + 10т/га	19.95	5.86	43.0	4.46	0.61	15.8	32.06	7.21	29.1	6.63	0.50	8.2	3.60	1.46	68.2	1.83	0.37	23.6
NPК3 + 10т/га	19.45	5.81	42.6	4.33	0.48	12.5	30.87	6.02	24.2	6.54	0.41	6.7	3.64	1.5	70.6	1.96	0.26	16.6
NPК1 + 15т/га	19.97	6.33	46.4	4.42	0.57	14.8	32.01	7.16	18.8	6.88	0.75	12.2	3.61	1.47	68.7	1.94	0.39	24.8
NPК2 + 15т/га	19.44	5.80	42.5	4.29	0.44	14.4	32.97	8.12	32.7	6.40	0.27	4.4	3.60	1.46	68.2	1.94	0.37	23.6
NPК3 + 15т/га	19.99	6.35	46.6	4.34	0.49	12.7	33.83	8.98	36.7	6.42	0.29	4.7	3.63	1.49	69.6	1.91	0.34	21.7
15т/га	18.61	4.97	36.4	4.48	0.53	13.8	32.73	7.88	31.7	6.47	0.34	5.6	3.19	1.05	49.1	1.88	0.31	19.7
DL05, т/га	1.40			0.39			3.23			0.61			0.29			0.15		

Таблица 7.10. Эффективность использования азота и фосфора различными культурами в севообороте на фоне разных доз минеральных удобрений, 2011-2016, НИИПК *Seleçtia*

Доза минеральных удобрений	Азот				Фосфор			
	Прибавка урожая т/га	Поглощение прибавкой урожая (т/га) *	Внесено (кг/га)	ЭИА, %	Прибавка урожая (т/га)	Поглощение прибавкой урожая**	Внесено (кг/га)	ЭИФ, %
<i>Озимая пшеница</i>								
$N_{60}P_{30}K_{30}$	0.64	19.2	60	32.0	0.64	5.4	30	18.0
$N_{90}P_{60}K_{60}$	0.49	14.7	90	16.3	0.49	4.2	60	7.0
$N_{120}P_{60}K_{60}$	0.64	19.2	120	16.0	0.64	5.4	60	9.0
<i>Сахарная свекла</i>								
$N_{30}P_{30}K_{30}$	3.75	7.7	30	25.7	3.75	2.6	30	8.7
$N_{60}P_{60}K_{60}$	4.80	9.9	60	16.5	4.80	3.3	60	5.5
$N_{90}P_{120}K_{90}$	5.45	11.2	90	12.4	5.45	3.7	120	3.1
<i>Кукуруза на зерно</i>								
$N_{60}P_{30}K_{30}$	0.91	15.2	60	25.3	0.91	7.4	30	24.7
$N_{90}P_{45}K_{45}$	0.82	13.7	90	15.2	0.82	7.3	45	16.2
$N_{150}P_{60}K_{60}$	0.26	4.3	150	2.9	0.26	2.3	60	3.8
<i>Подсолнечник</i>								
$N_{30}P_{60}K_{30}$	0.27	13.5	30	45.0	0.27	7.5	60	12.5
$N_{60}P_{90}K_{60}$	0.33	16.5	60	27.5	0.33	9.1	90	10.1
$N_{60}P_{120}K_{60}$	0.33	16.5	60	27.5	0.33	9.1	120	7.6

* Количество азота, потребляемое 1 тонной основной и побочной продукции на удобренных делянках озимой пшеницы, равно 30 кг/га, сахарной свеклы – 2,06 кг/га, кукурузы на зерно -16,7 кг/га, подсолнечника – 50,0 кг/га.

** Количество фосфора, потребляемого 1 тонной основной и побочной продукции на удобренных делянках озимой пшеницы равно 8,5 кг/га, сахарной свеклы – 0,68 кг/га, кукурузы на зерно- 8,9 кг/га, подсолнечника – 27,6 кг /га. Данные за 1971-1990 гг.

Средняя температура воздуха увеличилась почти на 1,5 °С, а годовое количество осадков уменьшилось почти на 100 мм. Трудно переоценить влияние изменения климата и снижения плодородия почв на тенденции изменения урожайности.

Средние урожаи при различных системах удобрения (таблица 7.9) показывают, что навоз сам по себе имеет тот же эффект, что и навоз, дополненный минеральными удобрениями; поэтому отказ от применения дополнительных минеральных удобрений не приведет к снижению урожайности, по крайней мере – на черноземах. Кроме того, эффективность использования питательных веществ из минеральных удобрений очень низкая. Расчеты эффективности использования азота и

фосфора за последние 6 лет (таблица 7.10, с учетом данных из таблицы 7.9) показывают, что эффективность использования азота (ЭИА) для озимой пшеницы составляла 32,0% для дозы минеральных удобрений в севообороте NPK 1 ($N_{60} P_{30} K_{30}$ кг д.в./га), но только 16,3 и 16,0% для более высоких доз в NPK 2 и NPK 3 соответственно; эффективность использования фосфора (ЭИФ) составила 18,0, 7,0 и 9,0% соответственно. Для сахарной свеклы значение ЭИА составляло 25,7% для самой низкой нормы внесения удобрений ($N_{30} P_{30} K_{30}$ кг д.в./га) и снижалась при NPK2 и NPK3 до 16,4 и 12,4% соответственно; ЭИФ составила 8,7, 5,5 и 3,1% соответственно. Для кукурузы ЭИА при NPK1, NPK2 и NPK3, соответственно, составила 25,3, 15,2 и 2,9%; ЭИФ составила 24,7, 16,2 и 3,8% соответственно. ЭИА была выше для подсолнечника на 45,0, 27,5 и 27,5% соответственно; ЭИФ составила соответственно 12,5, 10,1 и 7,6%.

Даже при самых низких дозах минеральных удобрений ЭИА для озимой пшеницы, сахарной свеклы и кукурузы на зерно составляет всего 25-32%, а для подсолнечника – 45,0%. Остальная часть применяемого азота теряется при выщелачивании и в виде газообразных выбросов. Фосфорные удобрения еще менее эффективны: ЭИФ составляет только 8,7-24,7% при самых низких нормах внесения, снижаясь до 3,1-9,0% при более высоких нормах. В таблице 7.11 показаны аналогичные результаты многолетних полевых опытов на полях в Морроу в Иллинойсе (Koeper, 1992). В течение 1904-1954 гг. средняя урожайность кукурузы, выращиваемой в севообороте с клевером, получавшим навоз, известь и фосфор, была такой же, как и средняя урожайность кукурузы, получавшей дополнительно NPK в течение 1954-1964 гг. Merbach и др. (2000) приводят еще один пример длительного воздействия навоза в полевом опыте с бессменной озимой рожью в Галле, Германия. Эффект от навоза, внесенного между 1893 и 1953 годами, все еще можно наблюдать в виде большей способности почвы обеспечивать азотом растения.

Таблица 7.11. Урожайность кукурузы на зерно в севообороте и бессменной культуре (т/га) при различных системах удобрения, Урбана, Иллинойс, США (по данным проф. Koeper, 1992).

	Бессменная кукуруза на зерно	Севооборот	
		Кукуруза-овес	Кукуруза-овес-клевер
1904 -1954			
Неудобренный (Фон 1)	2.52	2.17	3.96
Навоз + известь + P ₂ O ₅ (Фон 2)	4.26	6.82	7.30
1904-1964			
Фон 1 + NPK	5.67	6.24	6.90
Фон 2+ NPK	6.39	7.04	7.24

Таблица 7.12. Прибавка урожая, необходимая для оплаты внесенных доз минеральных удобрений, НИИПК *Selectia*.

Культуры	Дозы минеральных удобрений	Прибавка урожая за 2011-2016, т/га	Стоимость прибавки урожая, лей/га	Стоимость удобрений, лей/га	Разница, лей/га	Прибавка урожая, необходимая для оплаты удобрений, т/га
Озимая пшеница	NPK 1	0.64	1 600	2 271	- 671.0	0.91
	NPK 2	0.49	1 225	4 172	- 2 947	1.70
	NPK 3	0.69	1 725	4 542	- 2 817	1.82
Сахарная свекла	NPK 1	3.75	2 250	1 773	+ 477	3.0
	NPK 2	4.80	2 880	3 408	- 528	5.7
	NPK 3	5.45	3 270	3 966	- 696	6.6
Кукуруза на зерно	NPK 1	0.91	1 820	2 271	- 451	1.14
	NPK 2	0.82	1 640	3 549	- 1 909	1.78
	NPK 3	0.26	520	5 114	- 4 594	2.56
Подсолнечник	NPK 1	0.27	1 485	2 182	- 697	0.40
	NPK 2	0.33	1 815	3 875	- 2 060	0.70
	NPK3	0.33	1 815	4 098	- 2 283	0.75

Несмотря на то, что цены на сельскохозяйственную продукцию были снижены, стоимость минеральных удобрений превысила уровень, который можно компенсировать за счет повышения урожайности (таблица 7.12). В годы с хорошим количеством осадков стоимость невысоких доз удобрений может быть компенсирована прибавкой урожая, но в этом регионе мира сухие годы стали нормой. Мы не можем ожидать более низких цен на минеральные удобрения и в то же время более высоких цен на сельскохозяйственную продукцию; обычный бизнес неустойчив – четкий сигнал о том, что мы должны изменить наш подход к интенсификации сельского хозяйства.

7.2.3. Доля плодородия почв в формировании урожайности

Доля плодородия почвы в формировании урожая обратно пропорциональна реакции на удобрение: чем больше дополнительный урожай от удобрения, тем меньше доля плодородия почвы и наоборот (таблица 7.13, рис. 7.11).

Доля плодородия почвы в формировании урожая снизилась в следующем порядке: кукуруза на зерно (85-96%) – озимая пшеница (83-89%) – подсолнечник (75-83%) – сахарная свекла (64-85%) – вика- овес (53-79%) – яровой ячмень (29-56%). На неудобренных делянках доля плодородия почв в формировании урожая составляет 100%. В среднем за 1971-2016 гг. минеральные удобрения снизили долю плодородия почв в формировании урожайности до 86,8, 76,0 и 74,8% соответственно для фонов удобренности NPK 1, NPK 2 и NPK 3 в севообороте. При применении тех же норм минеральных удобрений вместе с навозом 10 и 15 т/га, а также при раздельном

Таблица 7.13. Доля плодородия почв в формировании урожайности (%) для различных культур в севообороте, среднее за 2011-2016 гг., НИИПК *Selectia*.

Системы удобрения	Вика-овес на зеленую массу	Озимая пшеница	Сахарная свекла	Кукуруза на зерно	Яровой ячмень	Подсолнечник
Неудобренный	100	100	100	100	100	100
НРК 1	79	83	85	85	56	84
НРК 2	73	87	81	87	49	79
НРК 3	57	83	78	96	46	79
10 т/га + НРК 1	60	85	76	90	40	75
10 т/га + НРК 2	57	84	71	93	32	76
10 т/га + НРК 3	57	85	76	93	29	83
15 т/га + НРК 1	54	85	71	88	31	75
15 т/га + НРК 2	58	89	67	96	32	76
15 т/га + НРК 3	53	87	64	95	30	78
15 т/га	64	86	68	94	51	80

внесении 15 т/га навоза доля плодородия почвы в формировании урожайности для всего севооборота находится на уровне 70,1-72,8% (рис. 7.11). Вот почему Прянишников Д. Н. (1953) настаивал на том, что соотношение между биологическим азотом (из почвенного органического вещества и других источников, в том числе из биологической азотфиксации) и азотом из минеральных удобрений должно составлять 3:1, даже при высоких дозах минеральных удобрений. Несоблюдение этого требования привело к возникновению множества экологических проблем.

Некоторое время назад мы проанализировали изменение соотношения между различными источниками азота в количестве азота, потребляемого сельскохозяйственными культурами в Республике Молдова (Боинчан, 1999). До 1990 года это соотношение было более или менее устойчивым. После 1990 года приватизация земли и разделение земледелия и животноводства привели к сокращению площади под многолетними бобовыми культурами и количества произведенного на фермах навоза – важнейших источников восстановления плодородия почв. К 1995 году некомпенсированный дефицит азота в общем количестве азота, потребляемого сельскохозяйственными культурами, увеличился более чем на 50 процентов.

Большее количество минеральных удобрений не увеличит плодородие почвы; они ускоряют минерализацию почвенного органического вещества. В 1942

году Смит (*Smith*, 1942) сообщил о результатах 50-летних полевых опытов, где минеральные удобрения сохраняли высокий урожай, но уменьшали содержание общего азота в почве. *Rubenzam and Raua* (1969, цитируется по: Лыков и др., 2004) проанализировали данные 75-летних опытов с вечной рожью в Галле. Они обнаружили, что урожай потреблял такое же количество азота из минеральных удобрений и из навоза, использованного отдельно (67 и 68% по сравнению с неудобренными деланками), но количество азота, используемого культурой и фиксируемого почвой как органическое вещество, было совсем другое. На участках, получающих минеральные N-удобрения, культура использовала 58% внесенного азота, а почва фиксировала 9%, а на участках, получавших навоз, растения использовали 39,5%, а почва фиксировала 28,9%. Тюрин (1956), обобщив данные многолетних полевых опытов, проведенных в Аскове (Дания) и в Ротамстеде (Англия), обнаружил, что минеральные удобрения повышают урожайность больше, чем навоз, но вносят меньший вклад в запасы углерода и азота в почвах; сочетание навоза и минеральных удобрений дает лучший из обоих видов удобрения результат.

Советов (1867), один из первых русских агрономов, считал, что навоз нельзя заменить минеральными удобрениями. По-прежнему существуют различные мнения о влиянии минеральных удобрений на органическое вещество почвы, связанное с количеством оставшихся в почве растительных остатков. С одной стороны, Минеев и Шевцова (1978) утверждают, что большая масса корней в результате внесения удобрений может компенсировать увеличение потерь органического вещества в почве в результате минерализации. С другой стороны, Лыков и др. (1977) и Шилова и др. (1977) утверждают, что масса корневой системы не увеличивает пропорционально увеличению урожайности и, следовательно, она не может поддерживать содержание органического вещества почвы – количество азота, иммобилизованного из минеральных удобрений, является недостаточным для поддержания запасов азота в почве. Результаты полевых экспериментов в Санборне убедили Альбрехта (*Albrecht*, 1979) в разрушительном воздействии минеральных удобрений на азот и органическое вещество почвы. Ранее мы ссылались на данные, полученные *Mulvaney* и др. (2001) в опытах на *Morrow Plots* о негативном влиянии 40-50-летнего применения азота из минеральных удобрений на органическое вещество почвы и общий азот, и аналогичные результаты были получены в долгосрочной перспективе в полевых опытах во всем мире (*Mulvaney* и др. 2009). Беспристрастный анализ *Geisseler and Scow* (2014) обнаружил уменьшение микробной углеродной биомассы в агроэкосистемах под влиянием поступления азота, но увеличение микробной углеродной биомассы в результате увеличения лабильной доли углерода.

Нет никаких сомнений в том, что поступление синтетического азота намного превышает количество, потребляемое сельскохозяйственными культурами. Эффективность использования N из минеральных удобрений составляет 20-36 процентов; остальная часть теряется при выщелачивании в грунтовые воды или при выбросе оксидов азота в атмосферу. А азотные удобрения стоят намного дороже, чем раньше. Конечно, пришло время переоценить ценность биологических источников азота и интеграцию сельскохозяйственных культур и домашнего скота для лучшего круговорота питательных веществ.

7.3. Круговорот питательных веществ

7.3.1. Интеграция земледелия и животноводства

Нарушение круговорота питательных веществ на сельскохозяйственных фермах произошло из-за упрощения севооборотов и разделения земледелия и животноводства, что сопровождалось увеличением размеров фермерских хозяйств и производством продукции для международных рынков. Структурные изменения в сельском хозяйстве и сельской экономике могут быть проиллюстрированы изменениями в американском кукурузном поясе: после Второй мировой войны поголовье крупного рогатого скота сократилось на 52%; посевные площади сена и овса – на 60 и 97% соответственно; в то же время посевные площади под кукурузой и соей увеличились на 29 и 80% – эти две культуры в настоящее время занимают 85 процентов посевных площадей (*Sulk and Tracy*, 2007). В Республике Молдова в 1990 году, до приватизации земли, кормовые культуры занимали 32% пахотных земель, в настоящее время – только 5% (*Boincean*, 2015).

Эти изменения создали проблемы как для земледелия, так и для животноводства: увеличение зараженности насекомыми и патогенными микроорганизмами, загрязнение почвы и воды, дефицит фосфатов и потеря плодородия почв вследствие исчезновения навоза на фермах (*Sulk and Franzluebbers*, 2014); рост зависимости от промышленных ресурсов (инпуты). *Crews and Brookes* (2014), *Simpson* и др. (2011) и *Horst* и др. (2011) сообщают, что большая фракция органического фосфора сохраняется в почве под многолетними культурами, в отличие от однолетних растений, и лучшее усвоение фосфора может быть достигнуто путем интеграции земледелия и домашнего скота в севообороте. Возвращение домашнего скота приведет к возвращению многолетних бобовых и злаковых трав, использованию побочных продуктов растениеводства и создаст возможность для получения энергии и удобрений из внутрихозяйственного производства биогаза (*Triboi and Triboi-Blondel*, 2014). Улучшение круговорота питательных веществ означает меньшую потребность в минеральных удобрениях. Увеличение поглощения углерода означает лучшую структуру почвы, инфильтрацию и водоудерживающую способность, прекращение эрозии почвы и повышение урожайности (*Glover et al*, 2007).

Многолетний многофакторный полевой опыт, проведенный в НИИПК *Selectia*, позволил оценить возможность двух севооборотов обеспечить питательными веществами сельскохозяйственные культуры при интеграции земледелия с животноводством (коровы и свиньи). Последовательность культур в двух севооборотах:

- I. 1. Люцерна + райграс, третий год жизни после первого укоса
2. Озимая пшеница
3. Сахарная свекла
4. Кукуруза на зерно
5. Озимый ячмень
6. Кукуруза на зеленую массу с подсевом люцерны и райграса
7. Люцерна + райграс на зеленую массу

- II. 1. Кукуруза на силос
2. Озимая пшеница
3. Сахарная свекла
4. Кукуруза на зерно
5. Горох на зерно
6. Озимая пшеница
7. Подсолнечник

Для обработки почвы использованы две системы: безплужная обработка почвы с дисковыми боронами и чередование отвального плуга с безотвальной обработкой почвы. Были применены три системы удобрения почвы: контроль без удобрений, только компостированный навоз, компостированный навоз + NPK. Каждый севооборот получал 10 т/га навоза, но количество минеральных удобрений было разное: $N_{12,8} P_{21,8} K_{14,2}$ кг д.в./га в севообороте, который включает люцерну и райграс, и $N_{38,6} P_{24,2} K_{24,2}$ кг д.в./га – в другом. Опыт проведен в трех повторностях. Площадь каждой опытной деланки составляла 264 кв. м. Химические средства против вредителей, болезней и сорняков не использовались.

Данные по урожайности для разных культур в обоих севооборотах были использованы для расчета кормовых единиц и переваримого протеина (таблица 7.14). Увеличение производства кормовых единиц и переваримого протеина в севообороте с многолетними бобовыми и злаковыми травами обеспечивает увеличение производства молока и свинины (таблица 7.15). При расчетах исходили из того, что для производства одного литра молока требуется 1,2 кормовых единицы и 104 г переваримого протеина на 1 кормовую единицу; а для производства одного кг свинины требуется 6 кормовых единиц и 110 г переваримого протеина на кормовую единицу. Мы приняли среднегодовое производство молока на одну корову за 4000 литров, а средний рыночный вес одного поросенка в товарной массе за -100 кг. Зная количество коров и свиней, которые нужно кормить, мы можем рассчитать количество навоза/га и содержание в нем NPK (таблица 7.16).

Таблица 7.14. Производство кормовых единиц и переваримого протеина (т/га) в многофакторном полевом опыте, среднее за два полных севооборота (1996-2009)

Показатели	Севооборот без смеси многолетних бобовых и злаковых трав		Севооборот со смесью многолетних бобовых и злаковых трав	
	Навоз	Навоз + NPK	Навоз	Навоз + NPK
Кормовые единицы, тонны (без соломы)	19.4	21.1	28.2	29.3
Переваримый протеин, кг (без соломы)	1 882.9	2 054	360.8	3 713.1
Переваримый протеин, г/кормовую единицу	96.9	97.4	127.7	128.7

Таблица 7.15. Производство молока и свинины на 1 га севооборота с использованием кормовых единиц и переваримого протеина, среднее за два полных севооборота (1996-2009 гг.)

Годовое производство	Севооборот без смеси многолетних бобовых и злаковых трав				Севооборот со смесью многолетних бобовых и злаковых трав			
	Навоз		Навоз+ NPK		Навоз		Навоз+ NPK	
	На кормовую единицу	На переваримый протеин	На кормовую единицу	На переваримый протеин	На кормовую единицу	На переваримый протеин	На кормовую единицу	На переваримый протеин
Молоко (литры)	16 192	15 090	17 575	16 450	23 500	28 858	24 417	30 204
Свинина (кг)	3 238	2 853	3 515	3 111	4 700	5 457	4 883	5 713

В таблице 7.17 показано количество NPK, вынесенного сельскохозяйственными культурами и возвращенного в почву через твердые и жидкие фракции навоза, но только для участков, удобренных только навозом. Разница между общим количеством NPK, произведенного при внесении навоза, используемого отдельно или вместе с NPK, была незначительной, поскольку добавление NPK к навозу не оказывало реального влияния на урожайность.

Мы должны учитывать качество и способность коровьего и свиного навоза восстанавливать плодородие почвы. Коровий навоз предпочтительнее, но сочетание разных животных создает наилучшие условия для полного восстановления плодородия почвы на ферме. Интеграция молочных коров в севооборот, включающий многолетние бобовые и злаковые культуры, не полностью компенсирует сельскохозяйственным культурам поглощенное количество азота, вносимого с навозом; дефицит составляет 29 кг/га, но это можно восполнить с помощью люцерны путем симбиотической фиксации азота. Баланс фосфора положительный. Небольшой дефицит калия не является проблемой для черноземов, которые очень богаты калием. Интеграция свиней в севообороте со смесью многолетних бобовых и злаковых трав дает положительный баланс азота и фосфора. В случае севооборота без многолетней смеси бобовых и злаковых трав интеграция коров компенсирует только половину N, вынесенного растениями; интеграция свиней компенсирует вдвое больше фосфора, вынесенного растениями. По сравнению с отдельным внесением удобрений NPK, круговорот питательных веществ посредством интеграции культур и животных в севооборот возвращает не только NPK в почву, но также и органические вещества, которые необходимы для поддержания плодородия.

Таблица 7.16. Общее количество NPK в твердой и жидкой фракциях навоза коров и свиней, полученного в условиях экспериментальных севооборотов, кг и кг/га севооборота.

Навоз	Севооборот без смеси многолетних культур						Севооборот со смесью многолетних культур					
	Навоз			Навоз+ NPK			Навоз			Навоз+ NPK		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
	Коровы											
Твердая фракция	228	105	228	246	113	246	432	199	432	456	210	456
Жидкая фракция	163	83	205	176	90	221	309	158	388	326	166	409
Всего	391	188	433	422	203	467	741	357	820	782	376	865
Всего на 1 га севооборота	56	27	62	60	25	67	106	51	117	112	54	124
	Свиньи											
Твердая фракция	282	359	286	308	392	288	549	688	492	565	720	515
Жидкая фракция	420	363	232	458	397	253	804	696	444	841	728	464
Всего	702	722	518	766	789	541	1353	1384	936	1406	1448	979
Всего на 1 га севооборота	100	103	74	109	113	77	193	198	134	201	207	140

Таблица 7.17. NPK, вынесенные с урожаем и возвращенные в почву с навозом, среднее за два полных севооборота (1996-2009 гг.), кг NPK/га севооборота

Севооборот без смеси многолетних культур						Севооборот со смесью многолетних культур					
Вынос питательных веществ			Возвращенные питательные вещества			Вынос питательных веществ			Возвращенные питательные вещества		
N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
<i>Коровы</i>											
111	40	119	56	27	62	145	45	135	106	51	117
<i>Свиньи</i>											
111	40	119	100	103	90	145	45	135	193	198	133

Растениеводство и животноводство можно интегрировать различными способами: севооборотами на основе пастбищных угодий, выпасом на растительных остатках и покровных культурах, злаками двойного назначения, сочетанием пастбищных угодий и лесопастбищного животноводства (*Sulk and Franzluebbers*, 2014). Но скот нуждается во внимании каждый день. На пахотных фермах уже нет квалифицированных работников, но, по крайней мере в Западной Европе, появилась новая профессия мобильных пастухов (мужчин и женщин), которые используют возможности кочевого скотоводства на пахотных фермах.

Животноводство получает плохую репутацию на том основании, что оно конкурирует за потенциальную человеческую пищу, низкую эффективность преобразования кормов, за производство парниковых газов жвачными животными. В этих аргументах не учитываются преимущества интеграции земледелия и домашнего скота в использовании наиболее эффективным способом бобовых и злаковых трав в севооборотах и побочных продуктов растениеводства, круговорота питательных веществ и увеличения биоразнообразия на уровне ферм и ландшафтов.

Кроме того, большие земельные площади могут использоваться только для выпаса животных; Мотт и др. (*Mottet and others*, 2017) сообщают, что 86% корма для скота не могут использоваться в качестве пищи для человека, 57% земли, используемой для кормления животных, не могут использоваться для производства продуктов питания; соевый жмых составляет всего 4 процента от общего запаса кормов. Кроме того, навоз является бесценным источником как органических веществ, так и питательных веществ: в Нидерландах 61% потребностей растений в азоте удовлетворяется за счет навоза (*European Commission*, 2012, цитируется по: *Mottet* и др., 2017), хотя и большая часть кормовых запасов основана на импорте.

Норфолкский четырехпольный севооборот (глава 5) был больше, чем чередование культур. Это была устойчивая система земледелия; кормовые культуры производили корма для животноводства, а навоз поддерживал как урожайность, так и плодородие почвы. Такая система эффективно использует не только почву, но и воду, и энергию. По словам Лестера Брауна (*Lester Brown*, 2006), для обеспечения суточной потребности человека в пище с помощью современного промышленного

производства системе требуется более 2000 литров воды. Сельское хозяйство потребляет более 70 процентов всей пресной воды, взятой из ручьев и подземных вод, а дефицит воды уже является проблемой во многих частях мира. Дэвид Пиментел (*David Pimentel*, 2011) подсчитал, что современное сельское хозяйство использует 10 килокалорий энергии ископаемого топлива для производства одной килокалории пищи; и Фредерик Киршенман (*Frederick Kirschenmann*, 2007, 2008) выступает за переход от системы ввода энергии (*energy-input system*) к системе обмена энергией (*energy-exchange system*). Одним из примеров является ферма по выращиванию уток/рыбы/риса/фруктов Такао Фуруно в Японии, которая не использует внешних инпутов энергии. Ранее он выращивал только рис, используя большое количество энергии и достигая только половину нынешнего урожая. Другой пример – из Вирджинии, где Джоэл Салатин (*Joel Salatin*) разработал производственную систему выпаса скота с большим разнообразием видов (не менее 40) и симбиотическими взаимоотношениями между различными животными; он использует немного ископаемого топлива, но производит яйца, цыплят-бройлеров, индеек, крупный рогатый скот, свиней и кроликов. Новая парадигма более устойчивой интенсификации сельского хозяйства может быть основана на биологическом синергизме между сельскохозяйственными культурами и домашним скотом, но предостерегающая история из нашего собственного опыта – уместна. В Шри-Ланке домашние сады Кандьяна устойчиво развивались на протяжении поколений. Это мелкие фермерские хозяйства, выращивающие не менее 40 различных продовольственных культур и специй вместе с домашней птицей; они обеспечивают более высокий уровень жизни по сравнению с соседними, разрушающимися мелкими хозяйствами, с бессменными посевами, но эти сады не были распространены широко, потому что трудно найти необходимые навыки и знания.

Необходимы дополнительные исследования пастбищных покровных культур (какие культуры и как ими управлять), а также возможностей использования многолетних культур в севообороте в качестве альтернативного источника биотоплива. Такое исследование, основанное на целостном подходе к менеджменту фермы и почвы, заслуживает государственного финансирования, потому что оно служит обществу и окружающей среде (*Sulk and Franzluebbbers*, 2014; *Franzluebbbers* и др., 2014), но для этого требуются специалисты из разных областей знаний и разных учреждений для совместной работы с фермерами и расширения знаний об агрономических, экологических, экономических и социальных преимуществах смешанного земледелия. Консервативное земледелие является хорошей платформой для совместного начала (*Reganold* и др., 1990; *Dumont* и др., 2012).

7.4. Выводы

1. Стремление к повышению урожайности и расширению фермерских хозяйств, вызванное безжалостным падением отпускных цен на фермах, проигнорировало снижение плодородия почв, что стало сдерживающим фактором для будущей устойчивой интенсификации сельского хозяйства.
2. По сравнению с бессменной культурой и упрощенным севооборотом, диверсифицированные севообороты увеличивают эффективность использования питательных веществ и воды. Включение в севооборот многолетних

- бобовых и злаковых трав придает растениям устойчивость к засухе, используя почвенную воду из глубинных слоев почвы.
3. Пополнение почвенной воды в осенний, зимний и весенний периоды происходит лучше в севообороте, чем в бессменной культуре, и намного выше, чем под черным паром. Черный пар должен быть запрещен из-за неэффективного использования воды и его разрушительного воздействия на органическое вещество почвы.
 4. На типичном черноземе Бельцкой степи внедрение различных систем удобрения почвы привело к первоначальному увеличению урожайности, но урожайность стабилизировалась за последние 20-25 лет. Самыми отзывчивыми культурами в севообороте являются сахарная свекла и озимая пшеница; кукуруза на зерно и подсолнечник практически не реагируют на удобрения. Яровой ячмень и вико-овсяная смесь на зеленую массу хорошо используют последствие удобрений, примененных под предшествующие культуры в севообороте.
 5. Увеличение доз питательных веществ с минеральными удобрениями не компенсирует растущие ежегодные потери органического вещества в почве в результате минерализации, особенно в условиях бессменного возделывания. Ежегодные потери органического углерода почвы типичным черноземом в среднем за 30 лет составляли 0,26-0,29 т/га в севообороте и 0,38-0,42 т/га в бессменной озимой пшенице и кукурузе.
 6. Чем выше нормы внесения минеральных удобрений, тем ниже эффективность использования питательных веществ, а прибавки урожая, полученные от наиболее отзывчивых культур, даже при низких дозах минеральных удобрений, не покрывают их стоимость. Мы должны найти более эффективные способы использования минеральных удобрений или найти им альтернативу. На полях, удобренных навозом, дополнительные минеральные удобрения не эффективны ни в агрономическом, ни в экономическом отношении, поэтому их негативное воздействие на окружающую среду можно сократить, если их не использовать.
 7. Доля плодородия почв в формировании урожая остается очень высокой, даже при оптимальных дозах внесения навоза и удобрений в севообороте. На черноземе эта доля составляет 83-89% для озимой пшеницы, 64-85% для сахарной свеклы, 85-96% для кукурузы и 75-83% для подсолнечника.
 8. Интеграция растениеводства и животноводства в севооборотах, включающих многолетние бобовые и злаковые травы, позволяет использовать кормовые культуры и побочные продукты основных сельскохозяйственных культур в качестве исходного сырья. В свою очередь, домашний скот возвращает навоз на поля, что компенсирует питательные вещества, потребляемые сельскохозяйственными культурами для формирования урожая, и органическое вещество, разлагаемое в результате минерализации.

«Имеющий слух да услышит»

Luke 8, 8.

Список литературы

- Albrecht WA. 1938 Loss of soil organic matter and its restoration. 347-367 in *Soils and Men*, Yearbook of Agriculture, US Dept Agriculture, Washington DC
- Albrecht WA. 1979 *The Albrecht papers, Vol. II-III*, edited by John Ikerd. University of Missouri, Colombia MO
- Altieri MA. 1999 The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74, 1-3, 19-31
- Balfour Lady EB. 1943 *The living soil. Evidence of the importance to human health of soil vitality, with special reference to national planning*. Faber and Faber, London
- Boincean BP. 2015 The scientific basis for ecological restructuring of agriculture on the steppes. *Agriculture for Development* 24, 26-31
- Boincean BP, LT Nica & SS Stadnic. 2010. Nitrate leaching for field crops in the Balti steppe. *Akademios* 1, 91-99
- Boincean BP, LT Nica & SS Stadnic 2014. Productivity and fertility of the Balti chernozem under crop rotation with different systems of fertilization. 209-232 in DL Dent (editor) *Soil as World Heritage*, Springer, Dordrecht
- Boincean BP, LT Nica, SS Stadnic & LI Bulat 2011. Soil fertility and fertilization of Chernozem from Balti steppe. *Akademios* 1, 110-121
- Brown L 2006 *Plan B*. WW Norton, New York
- Brundrett M 1991 Mycorrhizas in natural ecosystems. *Advances in Ecological Research* 21, 171-313
- Cassman K & RR Harwood 1995 The nature of agricultural systems: food security and environmental balance. *Food Policy* 20, 5, 439-454
- Crews TE & PC Brookes 2014 Changes in soil phosphorus forms through tie in perennial versus annual agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 184, 168-181
- Franzluebbers AJ 2014a Toward agricultural sustainability through integrated crop-livestock systems: Environmental outcomes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190, 1-3
- Franzluebbers AJ 2014b Toward agricultural sustainability through integrated crop-livestock systems. II. Production responses. *European Journal of Agronomy* 57, 77-83
- Franzluebbers AJ, G Lemaire, PCF Carvelho and others 2014 Toward agricultural sustainability through integrated crop-livestock systems. III. Social aspects. *Renewable Agriculture and Food Systems* 29, 3, 192-194
- Gaisseler D & KM Scow 2014 Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms. A review. *Soil Biology and Biochemistry* 75, 54-63
- Gianinazzi S, A Gollotte, M-N Binet and others 2010 Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* 20, 8, 519-530
- Glover JD, CM Cox & JP Reganold 2007 Future farming: a return to roots? Large-scale agriculture would become more sustainable if major crop plants lived for years and built deep root systems. *Scientific American*, August, 82-89
- Haeckel E 1900 *The riddle of the universe*. Harper & Brothers, New York (In German, *Die Weiräthsel*. E Strauß, Bonn, 1899)
- Horst WJ, M Kamh, JM Jibrin & VO Chude 2001 Agronomic measures for increasing P availability for crops. *Plant and Soil* 237, 211-223
- Howard Sir Albert 1935 *The manufacture of humus by the Indore process*. Royal Society of Arts, London
- Howard Sir Albert 1943 *An Agricultural Testament*. Oxford University Press
- Kirschenmann FL 2007 Potential for a new generation of biodiversity in agroecosystems. *Agronomy Journal* 99, 373-376
- Koepf H 1992 *Soil fertility in sustainable low input farming*. Bulletin 3, Michael Fields Agricultural Institute, East Troy WI
- Kramer SB, J Reganold, J Glover and others 2006. Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 103, 12, 4522-4527

- Leopold A 1987 *A sand county almanac and sketches here and there*. Oxford University Press, New York
- Liebig J von 1840 *Organic chemistry in its application to agriculture and physiology*. Edited by Lyon Playfair, Taylor and Walton, London
- Liebig J von 1863 *The natural laws of husbandry*. Edited by John Blyth, Walton and Maberly, London
- Malhi SS, CA Grant, AM Johnston & KS Gill 2001 Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. *Soil and Tillage Research* 60, 101-122
- Merbach W, J Garz, W Schliephake and others 2000а. The long-term fertilization experiments in Halle (Seale), Germany. Introduction and survey. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 629-638
- Millennium Ecosystem Assessment 2005 *Ecosystems and human well-being – Synthesis*. Island Press, Washington DC
- Mineev VG & LK Shevtova 1978 Influence of long-term application of fertilizers on soil organic matter and yields of crops. *Agrochemistry* 7, 134-141
- Mottet A, C Haan, A Falcucci and others 2017 Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security* 14, 1-8
- Mulvaney RL, SA Khan, RG Hoefl & HM Brown 2001 A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1164-1172
- Mulvaney RL, SA Khan & TR Ellsworth 2009. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production. *Journal of Environmental Quality* 38, 2295-2314
- Näsholm T, K Kielland & U Ganeteg 2009 Uptake of organic nitrogen by plants. *Tansley Review. New Phytologist* 182, 31-48
- Pfeiffer E 1983 *Soil fertility, renewal and preservation. Biodynamic farming and gardening*. Lanthorn Press, England
- Pimental D 2011 *Agricultural production*. Published on line, October 2011
- Powlson DS, AJ MacDonald & PR Poulton 2014 The continuing value of long-term field experiments: insights for achieving food security and environmental integrity 131-158 in DL Dent (editor) *Soil as World Heritage*. Springer, Dordrecht
- Reganold JP, RI Papendick & JF Parr 1990 Sustainable agriculture. *Scientific American*, June 90, 112-121
- Shilova EI, PM Smirnov & GP Kosareva 1977 The ratio between mobilization and immobilization of nitrogen by using ¹⁵N. 51-52 in *Proceedings of the 5th congress of soil scientists in USSR, Book 3*, Minsk
- Simpson RJ, A Oberson, R Culvenor and others 2011 Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant and Soil* 349, 1, 89-120
- Smith GE 1942 *Sanborn Field. Fifty years of field experiments with crop rotation, manure and fertilizers*. Missouri Experimental Station Bulletin 458, University of Missouri, Columbia MO
- Sulc RM & BF Tracy 2007 Integrated crop-livestock systems in the U.S. Corn Belt. *Agronomy Journal* 99, 335-345
- Sulk RM & AJ Franzluebbers 2014 Exploring integrated crop-livestock systems in different eco-regions of the United States. *European Journal of Agronomy* 57, 21-30
- Triboi E & A-M Triboi-Blondel 2014 Towards sustainable, self-supporting agriculture. Biological nitrogen factories as a key for future cropping systems. 329-242 in DL Dent (editor) *Soil as world heritage*. Springer, Dordrecht
- Боинчан Б.П. Экологическое земледелие в Республике Молдова (Севообороты и органическое вещество). Кишинев: Штиинца, 1999. 299 с.
- Вильямс В.Р. Избранные труды, тома 5-10. М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1950-1952.
- Вильямс В.Р. История плодородия почвы. Том 1. Наука о плодородии почв в 19 веке. М.-Л.: Сельхозгиз, 1940.
- Виноградский С. Н. Почвенная микробиология. Проблемы и методы. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 897 с.
- Докучаев В. В. Русский чернозём: [Отчет Вольному экономическому обществу]. СПб., 1883. // Второе издание с предисловием В.Р. Вильямса. М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1952.

- Докучаев В.В. Избранные труды. т. 1. М.: ОГИЗ, Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1948.
- Костычев П. А. Почвоведение. Тома I-III. М.: Сельхозгиз, 1940.
- Костычев П. А. Почвы черноземных областей России. М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1949.
- Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения М.: Изд-во АН СССР, 1958. 465 с.
- Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н. Органическое вещество пахотных нечерноземных почв. М.: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2004. 630 с.
- Прянишников Д. Н. Азот в растениеводстве и в земледелии. Избранные труды. Вып. II. М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1953.
- Прянишников Д.Н. Избранные сочинения: Агрохимия, т.3. М.: Колос, 1965. 639 с.
- Советов А. О системах земледелия. Санкт-Петербург. Типография товарищества «Общественная польза», 1867. 286 с.
- Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 320 с.

ПОТЕНЦИАЛ ЧЕРНОЗЕМОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И СМЯГЧЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Всякий, кто сумел вырастить два колоска пшеницы там, где раньше рос только один, или две травинки, где раньше росла лишь одна, заслуживает признательности всего человечества, и для своей страны он сделал значительно больше, чем все ее политики, вместе взятые.

Путешествия Гулливера. Джонатан Свифт, 1728

Аннотация. Политический императив дешевой еды привел к снижению отпускных цен на фермах, увеличению размеров ферм и стимулированию индустриального сельского хозяйства. Рост производства между 1960-ми и 1980-ми годами был частично обусловлен селекцией растений, но в равной степени дешевой энергией и ее производных, включая азотные удобрения и пестициды, а также расширением ирригации. Но система неустойчива: непредвиденные расходы включают истощение органических веществ почвы, выбросы парниковых газов и дезинтеграцию сельских общин. Регенерация почвы является важной отправной точкой в необходимом переходе к устойчивому развитию.

Сравнительный анализ органического углерода в черноземных почвах под естественными лугами и пахотными землями в России, Украине, Казахстане и Молдове подтверждает большие возможности для сокращения выбросов CO₂, секвестрации углерода и увеличения производства сельскохозяйственных культур. С 1963 года традиционные системы земледелия истощили органический углерод в почве на 2,4-3,8 тС/га/год. Выбросы CO₂ составляют около 77 Гт или 10 частей на миллион атмосферного CO₂. Текущие выбросы можно уменьшить вдвое, приняв консервативные севообороты и отказавшись от черного пара. Консервативное земледелие, включающие севообороты с многолетними травами и бобовыми культурами, без черных паров и при нулевой обработке почвы, может достичь умеренного ежегодного прироста 0,5-1,5 т/га в течение 20-25 лет, пока не будет достигнуто новое устойчивое состояние.

В то же время консервативное земледелие предусматривает большие и более надежные сельскохозяйственные урожаи с меньшими индустриальными инпутами или даже вообще без них, что экономит много денег. Простые расчеты показывают, что при соблюдении консервативного севооборота дополнительное коли-

чество зерна, производимого на черноземах в четырех странах, может составлять 64-128 млн тонн в год, что вдвое больше нынешнего экспорта. Система восстановительного земледелия может поддерживать обновление сельских общин, продовольственную систему, основанную на местном производстве свежих продуктов, и более тесную связь между производителями и потребителями. Для смягчения последствий глобального потепления и повышения продовольственной безопасности, безусловно, потребуется больше, чем это, а также потребуется согласованная профессиональная и политическая воля.

Ключевые слова: смягчение последствий изменения климата, продовольственная безопасность, органический углерод почвы, выбросы CO₂, секвестрация углерода, урожайность зерна, регенерация сельских сообществ.

8.1. Введение

Производство и поставка продуктов питания зависят от того, кто чем владеет, кто что делает, кто что получает и что они с этим делают, – каждый из них испытывает потрясения из-за нынешней и будущей неопределенности. Свифт, возможно, был несправедлив по отношению к политикам, которые были избреты обществом, чтобы справиться с такой неопределенностью и сложными основами; но факт остается фактом: реальная стоимость дешевого продовольствия возникла в результате деградации почвы, нанесения ущерба здоровью населения и разрушения структуры сельских обществ. Столкнувшись с этими бедствиями, понимаешь, что регенерация почвы – хорошее место и время, чтобы начать все сначала. Во-первых, еда, вода и углерод не могут быть доставлены без нее; с другой стороны, наука продвинулась до такой степени, что мы знаем, с чего начать.

История сельского хозяйства есть поиск путей восстановления плодородия почвы. Неудачи привели к исчезновению цивилизаций. Мы выступаем за систему земледелия, которая имитирует природные экосистемы – сложные живые сообщества, которые пережили наводнения и засухи, чумы и эпидемии в течение очень долгого времени. Принципами этого агроэкологического подхода являются: соблюдение разнообразных севооборотов, непрерывный почвенный покров из посевов или растительных остатков, нулевая обработка почвы, интеграция земледелия и животноводства, а также стратегически расположенные защитные лесополосы, пруды и водно-болотные угодья на ландшафтном уровне (*Krupenikov and others, 2011*). Реализация этих принципов на практике потребует ноу-хау и новых навыков на фермах и в сельских общинах, а это означает новые средства к существованию. Это также открывает возможности для воссоединения производителей и потребителей, что также создаст новые источники средств к существованию. Возможно, более мелкие фермы будут жизнеспособными, но это не призыв к возвращению в крестьянство; мы достаточно мудры, чтобы не предсказывать, как все обернется в политической экономике.

Здоровье почвы принесет пользу немедленно. В свою очередь, улучшение здоровья почвы уменьшит зависимость от деструктивной вспашки, дорогостоящих

промышленных инпутов и расточительного орошения, а питание через цепочку почва – растения – скот – люди необходимо для улучшения качества продуктов питания, здоровья населения и окружающей среды. А благодаря улавливанию углерода в качестве органического вещества почвы, устойчивый менеджмент почв будет способствовать смягчению последствий глобального потепления и поможет приспособиться к неизбежным изменениям, повысив устойчивость почв и систем земледелия. «Повестка дня ООН до 2030 года» с ее целями в области устойчивого развития и Парижское соглашение о борьбе с изменением климата говорят нам, что это должно быть сделано немедленно (UN, 2015a, b).

8.2. Потенциал черноземов для повышения продовольственной безопасности и смягчения последствий глобального потепления

Парижское соглашение призвало к секвестрации 4 частей из тысячи углерода в год в качестве почвенного органического углерода (ПОС). Прежде чем оценивать возможный вклад черноземов, сначала мы должны рассмотреть, как эта задача была достигнута:

- годовые выбросы CO₂ при сжигании ископаемого топлива были приняты за 8,9 Гт¹ С, но к 2017 году они выросли до 13,4 Гт С (Джексон и др., 2017);
- глобальный ПОС на глубине 2 м был принят за 2400 Гт;
- расчет выбросов CO₂ в процентах от глобального ПОС:
$$8,9/2400 \times 1000 = 4 \text{ на тысячу.}$$

И второе: реалистична ли эта задача? Больше органического вещества в почве – это хорошо, но проблема достижения, не говоря уже о поддержании этого уровня секвестрации, огромна (Powlson and others, 2011). С одной стороны, сельскохозяйственные угодья составляют только 38% поверхности земли, пахотные только 12%. С другой стороны, трудно увеличить ПОС, не проведя серьезные изменения в землепользовании и менеджменте, таких как: улучшение пастбищ или смешанное сельское хозяйство, основанное на севооборотах с высокой долей злаковых трав и многолетних бобовых. Кроме того, наблюдаемое увеличение ПОС было в самых верхних 15-30 см: увеличение ПОС в двух верхних метрах будет проблематичным.

8.2.1. Потери и прирост органического углерода в почве под полевыми культурами

В книге «Чернозем спустя 100 лет после Докучаева», изданной под редакцией Виктора Ковды (1983), были собраны данные о потерях органического вещества почвы (ОВП) с самых верхних 30 см черноземной почвы по всей территории СССР. Например, чернозем в Молдове потерял 51-71 т/га (32-40% запасов, первоначально определенных Докучаевым) или 0,5-0,7 т/га/год. В 1960 и 2003 годах академик

1 гигатонна (Гт) = 1 000 000 000 метрических тонн.

Андрей Урсу снова отбирал образцы почвы в том же месте, что и Докучаев в 1877 году в тогдашней нетронутой степи: содержание ОВП снизилось с 5,72% до 3,75% в 1960 году и 3,36 в 2003 году. В Курской области России и Харьковской области Украины потери составили 150-180 т/га (38-39% от первоначальных запасов) или 1,5-1,8 т/га/год. Михайлова и др. (*Mikhailova and others*, 2000) оценили потери ОВП при непрерывном пахотном земледелии в сельской местности вокруг Курска как 17-38% и 26-43% под черным паром². Аналогичные тенденции отмечены для чернозема в Канаде, где потеря составила в среднем 30% ОВП по сравнению с местными пастбищами (*Vanden Bygaart* и др., 2003).

Чернозем утратил не только органическое вещество в результате минерализации, но и полностью утратил верхний слой почвы в результате воздействия всех ветров и разрушительного стока. Так или иначе, в течение столетия под плугом чернозем потерял 20-70% своего первоначального запаса гумуса – и эти потери продолжаются, поскольку поступление органического вещества (инпут) меньше, чем его вынос (аутпут). Регенерация почвы должна начинаться с секвестрации углерода.

Сопоставляя различные экспериментальные результаты, Минсани и другие (*Minsany and others*, 2017) обнаружили, что из 72 случаев, где было достигнуто увеличение ПОС, 26% были результатом преобразования пахотных земель в луга или леса, 8% – переходом от пахотных культур к севооборотам, включая многолетние злаковые травы и бобовые, и 29% включали существенные и продолжительные добавления навоза. Анализ полевых экспериментов в Ротамстеде, продолжавшихся в течение 7-157 лет и включавших внесение навоза, зеленое удобрение, внесение соломы и севооборот, (но ни один из них не предусматривал нулевую обработку почвы), также показывают значительное увеличение ПОС только тогда, когда произошли большие изменения в землепользовании и менеджменте. Хорошей новостью является то, что немного внесенного навоза проходит долгий путь; даже когда не было достигнуто значительного увеличения ПОС, существовало значительное улучшение физического состояния почвы, ее качества и функциональности (личное сообщение *David Powlson*).

В прериях канадских провинций полевые опыты на черноземах, продолжающиеся от восьми до 22 лет, показывают, что замена многолетних культур однолетними злаками увеличивает запасы ПОС в слое 0-30 см на 0,6 т С/га/год; замена бессменного посева или чередование – один год из трех оставлять под черным паром – увеличивает запасы ПОС на 0,23 тС/га/год. Измерение прироста ПОС при нулевой обработке почвы были ограничены верхним 15-сантиметровым слоем, и из семи наблюдаемых площадок только две показали существенный прирост, но в целом годовой прирост ПОС при нулевой обработке составил 0,14 т С/год (*Vanden Bygaart and others*, 2010). От принятия всего комплекса мер, включая многолетние культуры в рамках консервативного севооборота, можно ожидать накопления около одной тонны С/га/год.

2 Обычный массовый коэффициент преобразования ПОС в ОВП составляет 1,72. Процедура окисления по Тюрину, обычно используемая в России, недооценивает ПОС по сравнению со сгоранием, поэтому следует использовать дополнительный коэффициент преобразования 1,13.

К сожалению, почти все имеющиеся в литературе данные по этой теме относятся к верхним 15-30 см почвы. Это не охватывает весь или даже большую часть гумусового горизонта чернозема, который может быть толщиной до метра. Поэтому мы оценили изменения в запасах ПОС типичного чернозема на глубину до одного метра в Курской области центральной России, используя данные Михайловой и др. (*Mikhailova and others*, 2000), а также результаты многолетних полевых опытов в Бельцкой степи в Молдове. Российские образцы были взяты из Центрально-черноземного государственного биосферного заповедника им. В.В. Алехина в нетронутой степи (залежь) и на сенокосном поле, скашиваемом ежегодно; а также на участке 50-летнего непрерывного пара и обрабатываемого поля в течение не менее ста лет на экспериментальной станции Всероссийского научно-исследовательского института сельского хозяйства и предотвращения эрозии почвы в Курске (таблица 8.1). В нетронутой степи запас ПОС составил 339,1 т/га, в том числе 238,8 т/га в верхнем (0-60 см) слое (70% от общего количества). Запасы на участке сенокоса были на самом деле больше: 351,5 т/га, в том числе 284,9 т/га в верхнем 60 см слое (81% от общего количества), что подчеркивает роль корневой системы лугов в создании и поддержании плодородия почвы. Запасы ПОС в верхнем метре почвы под пахотной почвой и под черным паром составили 290,3 и 273,3 т/га соответственно: потери относительно степных пастбищ составили 48,8 и 65,4 т/га (14 и 19% соответственно); потери из слоя почвы 0-60 см под непрерывным пахотным и черным паром были почти одинаковыми – 27,2 и 33,8 т/га, но потери ПОС были больше из более глубоких слоев почвы под черным паром. Мы ничего не знаем о методах ведения сельского хозяйства на данном участке (севооборот, система обработки почвы, удобрения и т. д.); мы можем только предположить, что потери ПОС под культурами, почти такие же, как от черного пара, происходят из-за скудного внесения навоза, большой доли пропашных культур и включения черного пара в севооборот.

Данные Михайловой выражены в единицах эквивалентной массы почвы (*Ellart and Bettany*, 1995). Это учитывает увеличение объемной массы в результате разрушения структуры почвы при потере гумуса. При сравнении бессменно возделываемого поля с залежью (нетронутая степь), увеличение объемной массы составляет 60-75% в верхних 30 см и 10% в слое 50-100 см. Рассчитанные таким образом изменения ПОС кажутся менее значительными, чем в сравнении с первичными концентрациями, но эти значения могут быть более достоверными и экологически значимыми. К сожалению, объемная масса не измеряется как само собой разумеющийся показатель в полевых опытах, поэтому зачастую невозможно применить эту поправку.

Другое важное различие между этими двумя местами состоит в том, что заповедник под Курском был под залежью в течение более 300 лет, тогда как залежь в Бельцах была основана только в 1984 году, будучи ранее пахотным полем. В этом интервале почва достигла устойчивого состояния, и в 2015 году анализ показал, что запасы ПОС составляют для слоев почвы 0-100 см и 0-60 см 342,3 и 225,3 ц/га соответственно, что не сильно отличается от чернозема залежи. В таблице 8.2 представлены данные о запасах ПОС в слоях почвы 0-100 см и 0-60 см в двух разных севооборотах, где вносили по 4 и 12 т/га навоза соответственно, и под 60-летним черным паром. В таблице 8.3 представлены данные об изменениях ПОС при

бессменной пшенице и бессменной кукурузе, а в таблице 8.4 сопоставимые данные для короткого севооборота (6, а не 10 полей) с 50% пропашных культур и ежегодной вспашкой с помощью отвального плуга.

Полевые опыты в Бельцах показывают большие различия в запасах ПОС между различными севооборотами и системами удобрения. В севообороте с 40% пропашных культур и 30% люцерны, получавшими в среднем 4 т/га/год навоза, запас ПОС в слое почвы 0-100 см составлял 273,7 т/га; в другом севообороте с 60% пропашных культур, но получавшем 12 т/га/год навоза, запас составил 281,7 т/га. По сравнению с залежью потери ПОС составили 68,6 и 60,6 т/га (20 и 18%) соответственно. Потери в слое почвы от 0 до 60 см составили 41,1 и 24,5 т/га соответственно (18 и 11%).

В условиях бессменного выращивания озимой пшеницы и кукурузы на зерно удобренные делянки ежегодно получали оптимальные нормы минеральных удобрений, а каждые три года – 13 т/га навоза. Запасы ПОС под бессменной пшеницей на неудобренных и удобренных делянках составили 244,5 и 293,2 т/га соответственно. По сравнению с залежью общие потери ПОС в слое почвы от 0 до 100 см составили 97,8 и 49,1 т/га (29 и 14%) соответственно; потери в слое почвы от 0 до 60 см относительно того же слоя почвы под залежью составили 57,3 и 17,9 т/га (25 и 8%). Потери ПОС в условиях бессменной кукурузы на зерно выше, чем в случае бессменной озимой пшеницы: запасы ПОС для неудобренной и удобренной кукурузы на зерно составили 234,5 и 258,3 т/га соответственно. По сравнению с залежью потери на глубине от 0 до 100 см составляют 107,8 и 84,0 т/га (32 и 25%) соответственно. На неудобренных и удобренных делянках потери ПОС из слоя почвы 0-60 см одинаковы для обеих культур: 57,3 и 61,5 т/га соответственно. На удобренных делянках потери ПОС под кукурузой на зерно намного выше: 46,5 т/га для бессменной кукурузы по сравнению с 17,9 т/га для бессменной озимой пшеницы, что подчеркивает склонность кукурузы на зерно к истощению почвы, даже при внесении навоза и минеральных удобрений.

Потери ПОС были еще больше в верхнем метре черного пара (120 т/га или 35%), а при шестипольном севообороте с 50% пропашных культур и интенсивной вспашкой, неудобренные делянки потеряли 165,8 т/га (48%) по сравнению с залежью, а делянки, получавшие только минеральные удобрения, потеряли 192,1 т/га (56%). Это значительные потери. Большая доля пропашных культур в севообороте и скудная доза навоза или вообще его отсутствие (обычный случай) означает двукратную или трехкратную потерю гумуса по сравнению с консервативными севооборотами, получающими более высокие дозы навоза. В отличие от ситуации в Курске, запасы ПОС на делянках с черным паром истощены больше в верхних 60 см, чем в более глубоких слоях почвы, но в обоих случаях эти потери неприемлемы.

8.2.2. Потенциальные изменения в запасах ПОС и выбросы CO₂

Концентрация атмосферного CO₂ в доиндустриальную эпоху была более или менее стабильной, около 280 частей на миллион. Примерно с 1750 года она росла быстрее и быстрее из-за изменений в землепользовании и сжигания ископаемого топлива. Текущий уровень в 400 ppm форсирует глобальное потепление.

Таблица 8.3. Запасы и потери ПОС с 1963 г. при бессменном выращивании озимой пшеницы и кукурузы

Слой почвы, см		Залежь		Бессменная озимая пшеница						Бессменная кукуруза на зерно					
				Неудобренный			Удобренный			Неудобренный			Удобренный		
Включительно	0-100	т/га	%	т/га	±	%	т/га	±	%	т/га	±	%	т/га	±	%
	0-60	342.3	100	244.5	-97.8	29	293.2	-49.1	14	234.5	-107.8	31	258.3	-84.0	25
	% от 0-100	225.3	100	168.0	-57.3	25	207.4	-17.9	8	163.8	-61.55	27	178.8	-46.5	21
		66		69			71			70			69		

Таблица 8.4. Запасы и потери ПОС с 1963 г. в условиях шестипольного севооборота с 50% пропашных культур и различных систем удобрения

Слой почвы, см		Залежь		Неудобренный с 1970 г.			Удобренный НРК 130 кг д.в./га			Удобренный 15т/га навоза+ НРК 130 кг д.в./га			Удобренный 15т/га навоза		
		т/га	%	т/га	±	%	т/га	±	%	т/га	±	%	т/га	±	%
Включительно	0-100	342.3	100	176.5	-165.8	48	150.2	-192.1	56	200.4	-141.9	41	201.7	-140.6	41
	0-60	225.3	100	159.9	-65.4	29	136.7	-88.6	39	176.2	-49.1	22	181.2	-44.1	20
	% от 0-100	66		91			91			88			90		

В последнем прогнозе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2018) содержится предупреждение о том, что для поддержания уровня глобального потепления в пределах 1,5 °C от доиндустриального уровня, чистые выбросы необходимо сократить на 33–45 процентов к 2030 году и до нуля к 2050 году.

Расчетные потери ПОС и соответствующие выбросы CO₂ из черноземов в России, Украине, Казахстане, Молдове представлены в таблице 8.5. Мы использовали оценку *L. G. Bai* по национальным регионам чернозема (см. таблица 3.1) и предположили, что 80% черноземных почв являются пахотными. Чистые выбросы CO₂ предполагают потерю 165 т С/га из пахотной почвы по сравнению со степью или залежью, выраженные в миллионах тонн CO₂ и в эквивалентной концентрации атмосферного CO₂ в частях на миллион (один ppm CO₂ в атмосфере равен 7.8 Гт).

Таблица 8.5. Расчетные потери ПОС и выбросы CO₂ из чернозема с 1963 года и потенциальная прибавка урожая зерна

Страны	Площадь черноземов, тысячи га	Пахотные земли, 80% от всей площади	Эмиссия CO ₂ Гт (ppm)	Прибавка урожая - 1 т/га из половины всей площади под зерновыми, млн т	Прибавка урожая 2 т/га, млн т
Россия	106 114	84 892	51.3 (6.6)	42.4	84.9
Украина	28 216	22 573	13.6 (1.75)	11.3	22.6
Казахстан	22 530	18 204	11.0 (1.4)	9.1	18.2
Молдова	2 496	1 997	1.2 (0.2)	1.0	2.0

Потери ПОС основаны на потере, измеренной на неудобренном севообороте с 50% пропашных культур, составляющей 165 т/га с 1970 года. Это умеренная цифра, учитывая потери в 192 т С/га при том же севообороте, но с добавлением минерального удобрения. Для чернозема четырех стран, по предварительным оценкам, общий объем выбросов CO₂ составляет 77 Гт или 10 ppm в результате минерализации гумуса; участки на склонах, подверженные эрозии почвы, потеряли на порядок больше. В Казахстане доминирующей почвой является каштанозем, так называемый двоюродный брат чернозема, к которому применяются все те же правила, но с большей строгостью; наши прогнозы в таблице 8.5 ограничены черноземом.

Тот же самый расчет, возможно, нереалистичен для чернозема во всем мире, для которого у нас нет полнопрофильных измерений, но, рискуя, можем предположить, что при средней потере в 165 т С/га, общая сумма могла бы быть порядка 100 Гт CO₂ или 13 ppm. Для сравнения, ежегодные глобальные выбросы CO₂ в настоящее время составляют около 40 Гт, но мы должны принять во внимание, что глобальная площадь черноземов составляет всего 1,7% свободной ото льда земли.

Чем больше деградирует почва, тем больше ее потенциал для улавливания углерода в долгосрочной перспективе, но тем меньше ее способность смягчать последствия глобального потепления и адаптироваться к нему в определенные временные рамки. Реально: прошлые выбросы не могут быть восстановлены; в

обозримом будущем понадобится больше зерна, чем когда-либо, а черноземы настолько хорошо приспособлены к производству зерна, что вероятность возвращения больших площадей под залежь маловероятна. Сильно деградированная почва – другое дело; в тех случаях, когда дальнейшее возделывание почвы не представляется возможным, эта почва может и должна быть возвращена под залежь или лес.

Даже при сохранении нынешней площади пахотной почвы выбросы CO_2 могут быть уменьшены вдвое, просто за счет сокращения площади под пропашными культурами и отказа от черного пара. Это сократит ежегодную потерю ПОС между 1,4 части на тысячу (с учетом 100-летних выбросов от непрерывной вспашки в регионе Курска) и 7-11 частей на тысячу (с учетом 50-летних выбросов в севооборотах в Бельцах, включающих 50% пропашных культур и без навоза). Это значительные потери, но не чистая (нетто) секвестрация, предусмотренная Парижским соглашением. Секвестрация углерода требует севооборотов, включающих многолетние бобовые и злаковые травы при нулевой обработке почвы, когда мы можем ожидать накопление 0,5-1,5 т С/га/год, по крайней мере, в краткосрочной перспективе (до 25 лет), пока не будет достигнуто новое устойчивое состояние. Принимая нынешние запасы углерода как 200 т С/га, секвестрация составляет от 2,5 до 7,5 частей на тысячу; а для России, Украины, Казахстана и Молдавии – ежегодное удаление из атмосферы 0,06-0,2 Гт CO_2 . Мы также должны подсчитать выбросы, сэкономленные путем прекращения эрозии почвы, которая может в 5-10 раз превышать потери ПОС при минерализации; сокращение промышленных выбросов путем замены минеральных удобрений местными источниками удобрений; и вдвое сократить потребление дизельного топлива в хозяйствах, приняв нулевую обработку почвы.

8.2.3. Продовольственная безопасность

Более разнообразные севообороты и интеграция земледелия и животноводства также приведут к повышению урожайности, хотя посевная площадь под зерновыми и пропашными культурами будет сокращена. Согласно нашим экспериментальным данным, урожайность озимой пшеницы и озимого ячменя после рано убираемых предшественников на неудобренных делянках в севообороте повышается как минимум на 1 т/га по сравнению с поздно убираемыми предшественниками. Применение навоза повышает урожайность как минимум на 2 т/га. Наличие навоза предполагает интеграцию земледелия и животноводства, но первая сельскохозяйственная революция в семнадцатом веке была подстегнута именно этим – в Норфолкском севообороте с четырьмя полями. Настало время для очередной революции.

Простой расчет показывает, что с помощью этих двух выше указанных приемов дополнительное количество зерна, производимого устойчиво на черноземах России, Украины, Казахстана и Молдовы, может составить 63,8 млн тонн в первом случае и 127,7 млн тонн во втором случае (таблица 8.5). Для сравнения: рекордный экспорт пшеницы из России в 2018 году составил 36 миллионов тонн (Reuters, 2018). Таким образом, потребность общества накормить увеличивающееся население с его растущими ожиданиями может быть удовлетворена уже в течение нескольких лет без дальнейшей деградации почв или общества.

8.3. Стратегическая поддержка более устойчивых систем ведения сельского хозяйства и сельских сообществ

Судя по повседневной работе, нынешняя индустриальная модель интенсификации сельского хозяйства и глобальная продовольственная система не отвечают поставленным целям. Теоретически агроэкологический подход к земледелию улучшит состояние всей пищевой цепочки почва-растения-животные-люди: реальность будет зависеть от новых подходов к менеджменту фермерских хозяйств и новых путей установления связей между производителями и потребителями, сельскими общинами и городами.

Альтернативные продовольственные системы, которые продвигают местные и сезонные продукты питания, уже зарекомендовали себя: общественные сады, сообщества фермеров, короткие цепочки поставок, такие как фермерские рынки, распродажи на фермах и продажи через Интернет, а также производство и розничная продажа сертифицированных продуктов (например, органических, местного происхождения, специализированных продуктов). Появляется все больше и больше аргументов в пользу высококачественной пищи местного производства для здоровья людей (Erixon, 2017; Shetreat-Klein, 2017). Некоторые из нижеследующих препятствий на пути к достижению положительных результатов могут быть устранены с помощью политики поддержки на местном и региональном уровнях и программ взаимного обучения фермеров (IPES Food 2017):

- Несоответствие между сезонной продукцией небольших ферм и потребностями предприятий пищевой промышленности и розничной торговли.
- Бремя документации для соблюдения законодательства о безопасности пищевых продуктов.
- Отсутствие адекватных возможностей для прямой продажи, хранения и переработки в хозяйстве.
- Проблема конкуренции с крупными фермерскими хозяйствами и корпоративными производителями.
- Недостаток фермерского ноу-хау как в производстве, так и в маркетинге более качественных продуктов питания.
- Доступ к земле и кредитам, особенно для молодых фермеров.
- Доступ к цепочкам поставок продуктов питания.

Если это камни преткновения, то продовольственная система сама по себе – трудное место. Она предлагает низкие и снижающиеся цены на выходе из хозяйства – отпускные цены, – и это только для сельскохозяйственных культур и скота, а не для предоставления экологических услуг, которые каждый принимает как должное. Выделяются две важнейшие экологические службы: улавливание углерода и снабжение пресной водой. Они переплетены, и в конечном счете, все зависит от политики – то, с чего началась эта глава.

Политическая поддержка для поощрения и поддержания необходимых изменений в методах ведения земледелия может включать: переходную поддержку для фермеров, занимающихся природоохранным сельским хозяйством, платежи за экологические услуги, налоговые льготы для фермеров, которые не загрязняют и

не ухудшают состояние почвы, воды и окружающей среды, защита рынка для местных производителей, поддержка сельской инфраструктуры, а именно сельскохозяйственные и местные перерабатывающие предприятия, местное семеноводство и размножение, инвестиции во внутрихозяйственное и региональное производство биогаза с использованием биомассы культур из севооборотов, доступное жилье в сельских районах (*Storcksdiek and others*, 2017). Даже без каких-либо директивных указаний с 1970-х годов консервативное земледелие было распространено на 12,5% глобальных пахотных земель, а в течение последнего десятилетия оно значительно расширилось и увеличивается в среднем на 10,5 млн га в год (*Kassam and others*, 2018). Тем не менее масштабы и срочность необходимых действий, выявленных в состоянии чернозема (рис. 01-05), и самый последний императив Межправительственной группы экспертов по изменению климата – сокращение выбросов парниковых газов на 45% к 2030 году (МГЭИК, 2018) – означает, что такой скорости сокращения недостаточно. Ничего, кроме трансформирующих национальных программ, не будет достаточным.

Одним из опробованных и проверенных решений является законодательство об ограничении выбросов парниковых газов и торговли квотами на них. Механизм компенсации выбросов углерода действует уже более десяти лет в Альберте, первом штате Канады с планом действий по борьбе с изменением климата (*Alberta Environment*, 2002). Необходимо, чтобы крупные источники выбросов парниковых газов ежегодно отчитывались об этом, что само по себе приведет к значительному сокращению и, следовательно, к повышению эффективности и конкурентоспособности. Установлены контрольные цифры и компании, которые не в состоянии их выполнить, платят налог в размере 15 долларов США за тонну CO_2 или приобретают компенсационные кредиты, полученные зарегистрированными государственными провайдерами с использованием утвержденных протоколов, которые гарантируют, что углеродные кредиты представляют собой реальную, доказуемую, поддающуюся количественному измерению и непосредственно измеримую секвестрацию (*Alberta Govt*, 2011). В сельскохозяйственном секторе, и только для Альберты, улавливание углерода при нулевой обработке почвы является одной из тех практик, которые имеют право на углеродные кредиты.

Это будущее. И это работает. Тот факт, что серьезные люди платят серьезные деньги за эту услугу, имеет больший вес, чем любые наши слова. Очевидно, что постоянство вызывает беспокойство, поскольку биологическое поглощение может быть обращено вспять либо случайно (лесные пожары), либо преднамеренно (возврат к обычной обработке почвы), но в течение двух лет, в 2009 году, сельскохозяйственные компенсации достигли 2,1 млн тонн CO_2 , что составляет 15% от целевого показателя Альберты по сокращению выбросов. Уроки, извлеченные из первых лет опыта Альберты и нескольких более ранних добровольных схем (*Reicosky and others*, 2012), включают в себя необходимость в следующем:

- Образовательная стратегия, демонстрирующая серьезность изменения климата и деградации земельных и водных ресурсов, а также срочность необходимых преобразований.
- Надежная научная основа для действий и пути объединения научных и политических деятелей для решения технических и социальных проблем.

- Стандарты измерений для создания, проверки и выдачи компенсаций парниковых газов, которые являются полными, совместимыми, последовательными, прозрачными и точными.
- Оказание фермерам помощи в ведении более точного учета и повышении эффективности менеджмента, включая вопросы постоянства и дополнительной секвестрации ПОС.
- Экосистемные услуги, связанные с менеджментом углерода в почве, должны быть более выгодными для фермеров, чем сами углеродные кредиты; это означает придание истинной экономической ценности этим, в настоящее время бесплатным, услугам. Тот же принцип был предложен для кредитов на зеленую воду, согласно которым водопользователи, расположенные ниже по течению, платят фермерам, находящимся выше по течению, за определенные услуги по управлению водными ресурсами (*Dent and Kaufman, 2007*).
- Неправительственные организации (НПО) и коммерческие компании для обеспечения работы рынка. Науки и политики недостаточно. Первым ключевым игроком в Альберте была Центральная организация по вопросам изменения климата – неправительственная организация, созданная в 2000 году для разработки инструментов и инфраструктуры для разработки углеродных квот; обеспечения платформы для встреч между регулируемыми органами, разработчиками протоколов и агрегаторами (сборщиками); проведения технических обзоров и обзоров заинтересованных сторон; ведения центрального регистра для размещения предложений по проектам, докладов и заявлений о проверке, а также определения тоннажа компенсаций. Следующий шаг – совокупные компании, которые собирают достаточно большие квоты (компенсации), чтобы заинтересовать крупных промышленных покупателей – небольшие индивидуальные фермы не генерируют необходимые объемы.

Еще один урок, на который мы должны обратить внимание, заключается в том, что Альберте потребовалось почти двадцать лет, чтобы добиться этого успеха. У нас нет еще двадцати лет, чтобы изменить ситуацию на несколько порядков. Это потребует серьезных, согласованных усилий и серьезных денег.

Эти средства уже предоставляются через «зеленые» облигации, поскольку крупные компании, котирующиеся на фондовом рынке, обязаны раскрывать информацию о рисках, связанных с изменением климата. Эти компании оцениваются в триллионы долларов. Страховщикам, которые могут влиять на эти риски, запрещается инвестировать средства в подконтрольные предприятия, но они могут инвестировать средства в «зеленые» облигации, выпущенные органами, компетентными для организации и управления работами, необходимыми для защиты от любого риска, связанного с климатом, для их активов и деятельности (Целевая группа по финансированию природоохранной деятельности, 2018). Огромная ценность городской инфраструктуры и повседневная деятельность любого крупного города зависят от природной среды, которая ее поддерживает и подпитывает. Каждая «зеленая» облигация была чрезмерно перегружена – единственным недостатком было отсутствие достаточного количества крупных проектов, чтобы

удовлетворить спрос. В самом начале деятельности по защите ресурсов речь шла о почвах, которые не накапливают дождевые осадки для пополнения «зеленой» воды, используемой сельскохозяйственными культурами, и грунтовых вод, от которых зависит столь значительная часть общества и повседневного бизнеса, но которые приводят к их затоплению вниз по течению.

Озеленение и защита от засухи черноземов степей, прерий и пампасов, благодаря устойчивому, рациональному с точки зрения климата земледелию и, следовательно, защите от наводнений повсюду вниз по течению, отвечает всем требованиям. Более того, оно выберет из атмосферы значительное количество CO_2 . Весь опыт Альберты имеет отношение к инициативам *Green Finance* (так называемое «зеленое» финансирование). Помимо непосредственных затрат на преобразование сельской инфраструктуры и сельскохозяйственной техники, а также стимулов для фермеров по изменению способов ведения хозяйства, необходимы междисциплинарные исследования и разработки для изучения экономических, экологических и социальных аспектов альтернативных систем ведения сельского хозяйства и мониторинга результатов. Нам нужна сеть региональных исследовательских центров, чтобы выяснить, как экосистемные и общественные услуги могут поддерживаться в условиях экономических и климатических изменений, и как более устойчивые, не влияющие на климат фермерские системы могут смягчать эти изменения и адаптироваться к ним. Потребуется новые институты или возобновятся старые службы распространения знаний, чтобы донести эти знания до фермеров и перенести наблюдения и исследования фермеров в общий поток. Это не будет дешево, кроме того, необходим постоянный менеджмент и аудит этих денег. Традиционно все эти расходы должны были покрываться за счет государственных финансов, потому что есть много аспектов, выходящих за рамки непосредственных интересов частных компаний, но адекватные государственные финансы редко появлялись – и никогда не поддерживались. Ликвидность, обеспечиваемая государственно-частным партнерством в рамках «зеленых» финансовых инициатив, делает желаемое и необходимое – возможным.

8.4. Выводы

1. Регенерация почвы является первым шагом на пути к восстановлению системы земледелия, и она должна начинаться с секвестрации углерода.
2. Сравнительный анализ ПОС в агроэкосистемах на степных черноземах подтверждает значительный потенциал для сокращения выбросов CO_2 , улавливания углерода в качестве органического вещества почвы и в то же время увеличения продуктивности. Улучшение состояния почвы при лучшей системе земледелия обеспечивает большую продуктивность при значительном сокращении промышленных вложений (ресурсов) или даже без них. Это сэкономит деньги, улучшит окружающую среду и сократит выбросы парниковых газов. Отказ от черного пара и принятие диверсифицированных севооборотов на степных черноземах сократит выбросы CO_2 вдвое и увеличит годовое производство зерна примерно на 64 млн тонн. Принятие природоохранного сельского хозяйства в полном объеме обеспечит чистую секвестрацию углерода и увеличит производство зерна на 128 млн тонн.

3. Система возрожденного земледелия будет способствовать восстановлению сельских общин, обеспечению достаточного энергопотребления в сельской местности, а также налаживанию системы продовольствия, основанной на увеличении местного производства свежих продуктов и более тесных связей между производителями и потребителями.
4. Смягчение последствий глобального потепления и повышение продовольственной безопасности, конечно, сложнее, чем вышесказанное. Это потребует согласованных действий со стороны общества в целом, профессиональной и научной поддержки и политической воли.

Список литературы

- Alberta Environment. 2002. *Climatic Change and Emissions Management Act*. Alberta Queen's Printer, Edmonton
- Alberta Government. 2011. *Technical guidance for offset protocol developers*. <http://environment.goc.ad.ca/info/library.831.pdf>
- Dent DL and J Kauffman. 2007. *The spark has jumped the gap: Green Water Credits proof of concept*. Green Water Credits Report 7, ISRIC – World Soil Information, Wageningen
- Ellart BH and JR Bettany. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science* 75, 520-538
- Erixon F. 2017. *Europe's obesity challenge*. ECIPE Policy Brief, European Centre for International Political Economy, Brussels
- Green Finance Task Force. 2018. *Accelerating green finance*. Report To HM Treasury, March 2018, London
- IPES Food. 2017. *Unravelling the food-health nexus. Addressing practices, political economy, and power relations to build healthier food systems*. Global Alliance for the Future of Food and International Panel of Experts on Sustainable Food Systems www.ipes-food.org
- Jackson RB, C Le Quéré, RM Andrew and others. 2017. Warning signs for stabilizing global CO₂ emissions. *Environmental Research Letters* 12, 11, 110202
- IPCC 2018 *Global warming of 1.5 °C, an IPCC special report on the impact of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related greenhouse gas emissions pathways*. IPCC Secretariat, Geneva
- Kassam A, T Friedrich and R Derpsch. 2018. Global spread of conservation agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, corrected <http://doi.org/10.10080/00207233.2018.1511353>
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623-1627
- Lal R. 2016. Feeding 11 billion on 0.5 billion hectare of area under cereal crops. *Food and Energy Security* 5, 4, 239-251
- Krupenikov IA, BP Boincean and DL Dent. 2011. *The black earth. Ecological principles for sustainable agriculture on chernozem soils*. Springer, Dordrecht
- Mikhailova EA, RB Bryant, II Vassenev and others. 2000. Cultivation effects on soil carbon and nitrogen contents at depth in the Russian chernozem. *Soil Science Society of America Journal* 64, 738 745
- Minasny B, BP Malone, AB McBratney and others. 2017 Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59-86
- Powlson DS, AP Whitmore and KT Goulding. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and false. *European Journal of Soil Science* 62, 42-53
- Reicosky DC, TW Goddard, D Enerson and others. 2012. Agricultural greenhouse gas trading in North America. 423-438 in MA Liebig, AJ Franzluebbers and RF Follet (editors) *Managing agricultural greenhouse gases. Coordinated research through GRACEnet to address our changing climate*. Academic Press, San Diego CA

- Reuters. 2018. *Russia's record wheat exports*. <https://www.reuters.com/russia-grains-export/update> accessed 3 September 2018
- Shetreat-Klein M. 2017. *The dirt cure. Healthy food, healthy gut, happy child*. ATRIA books, New York
- Storcksdiek gennant Bonsman S. and others 2017 Public procurement as a policy tool to promote healthier food environments and choices. *WHO Public Health Panorama* 3, 4, 648-654
- UN 2015a *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. General Assembly of the United Nations, New York
- UN 2015b *Framework for international coordinated effort to tackle climate change*. UN Framework Convention on Climate Change, Paris
- VandenBygaart AJ, EG Gregorich and DA Angers. 2003. Influence of agricultural management on soil organic carbon: A compendium and assessment of Canadian studies. *Canadian Journal of Soil Science* 83, 363-380
- VandenBygaart AJ, E Bremer, BG McConkey and others. 2010. Soil organic carbon stocks on long-term agroecosystem experiments in Canada. *Canadian Journal of Soil Science* 90, 543-550
- Боинчан Б.П. Экологическое земледелие в Республике Молдова (Севообороты и органическое вещество). Кишинев: Штиинца, 1999. 299 с.
- Русский чернозем - 100 лет после Докучаева. (ред. Ковда В.А.). М.: Наука, 1983. 300 с.

ПРОБЕЛЫ И ИХ ПРЕОДОЛЕНИЕ

Проблема – это разрыв между ситуацией и предпочтением. Искусство определения проблемы.

Уильям Дж. Сиффин, 1980.

Аннотация. Помимо необходимости увеличить производство продовольствия к 2050 году на 70% или даже вдвое, отвод дождевых осадков от наполнения водных ресурсов во избежание разрушительных стоков, эксплуатация и загрязнение водотоков и подземных вод, а также вклад сельского хозяйства в глобальное потепление – все это неотложные вопросы. Каждый из них является следствием недостатков в сельскохозяйственной практике. Современное индустриальное сельское хозяйство разрушает те самые ресурсы, от которых оно зависит: плодородие почвы, даже сама почва; вода; биоразнообразие; сельские общины.

Наука накопила достаточно знаний, чтобы проложить курс для устойчивого, экологически безопасного земледелия. На уровне поля можно остановить эрозию почвы, восстановить плодородие почвы, противостоять сорнякам, вредителям и болезням, имитируя природные экосистемы. Это может быть достигнуто путем поддержания непрерывного поверхностного покрытия почвы сельскохозяйственными культурами или мульчей из растительных остатков сельскохозяйственных культур, минимальной или нулевой обработкой почвы, севооборотами, включающими многолетние бобовые и злаковые культуры, а также интеграцией земледелия и животноводства, что позволяет применять навоз на полях. Большинство из этих методов являются элементами консервативного земледелия (КЗ), которое используется миллионами фермеров по всему миру. Но эти фермеры остаются в меньшинстве, потому что устойчивость требует не только перестройки системы ведения хозяйства, но, возможно, пересмотра всей продовольственной системы, чтобы рациональное земледелие было полезно как для фермеров, так и для общества.

Это не простая задача, и она не укладывается в рамки какой-либо отдельной дисциплины; для политиков пришло время протянуть руку помощи. Преодоление барьеров на пути к устойчивости требует политического вмешательства, материально-технической поддержки и нового уровня исследований и разработок со стороны междисциплинарных групп, способных справиться со сложностями.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, здоровье почвы, имитация природных экосистем, плодородие почвы, органическое вещество почвы, севооборот, сохранение сельского хозяйства, политика и политическая стратегия.

9.1. Где мы сейчас находимся

Быстро увеличивающееся население и растущие потребности в продовольствии требуют все больше продуктов питания, топлива и пресной воды. Потребности и ресурсы никоим образом не совпадают как между разными частями мира, так и между городом и деревней. Эта ситуация уравнивается торговлей, и чернозем является глобально значимым ресурсом не только из-за его абсолютного плодородия, но и потому, что черноземные почвы в США, России, Канаде и Украине обеспечивают более половины мирового экспорта пшеницы; самый быстрый рост происходит в России, Украине и Аргентине.

Таким образом, земледелие должно производить все больше и больше, предоставлять основные экологические услуги и в то же время бесконечно восстанавливать плодородие почвы. Однако одним из аспектов системы продовольственного снабжения является несостоятельный рынок: в ценах, устанавливаемых фермерскими хозяйствами, не учитывается снижение плодородия почв и оказание таких экологических услуг, как водоснабжение и улавливание углерода. В результате производители и экспортеры продуктов питания субсидируют всех из нас, способствуя деградации почвы. Сельское хозяйство уничтожает те самые ресурсы, от которых оно зависит: почву, воду, биоразнообразие и сельские сообщества. И даже если бы были выплачены надлежащие цены, сама почва не может быть заменена ископаемым топливом, капиталом или даже знаниями. Это незаменимо.

Чернозем является лучшей пахотной почвой в мире, но неоспоримые наблюдения и измерения за последние 35 лет показывают, что ее производительность снижается в Восточной Европе и Центральной Азии, а также в Пампасах и в Чако в Южной Америке; его плодородие разрушается; сама почва вымывается и выдувается.

Основная причина заключается в том, что многолетняя растительность, которая создавала эту почву и постоянно защищала ее поверхность, была заменена одностолетними культурами, которые не могут восстановить ее плодородие.

Положение усугубляется интенсивной обработкой почвы и необоснованным использованием искусственных удобрений, без компенсации постоянных потерь от минерализации органического вещества почвы.

9.2. Преодоление пробела

Бизнес обычно не может преодолеть разрыв между тем, где мы сейчас находимся, и тем, где мы должны быть. Это требует нового, иного подхода – экологической трансформации систем земледелия, с тем чтобы эти системы могли производить продукты питания и сырье, необходимые обществу, и в то же время могли предоставлять одинаково важные экосистемные и социальные услуги. В то время как

предпринимательское сельское хозяйство сжигает природные ресурсы и дополняет солнечную энергию ископаемым топливом, экологическое сельское хозяйство восстанавливает ресурсы, используемые в растениеводстве, имитируя естественные экосистемы, которые пережили засуху, болезни и эпидемии в течение многих миллионов лет. Вероятно, для начала нам будет достаточно лишь пересмотреть всю продовольственную систему и, опираясь исключительно на результаты полевых наблюдений и на опытные данные, предложить для рассмотрения сформулированные ниже вопросы.

Один из нас был агрономом более сорока лет. Благодаря работе с фермерами, их удивительному творческому потенциалу, их успехам и неудачам, стали очевидными две вещи: во-первых, чем лучше качество и здоровье почвы, тем больше устойчивость к засухе, сорнякам, вредителям и болезням – и больше прибыль; во-вторых, для хорошего фермера лучшее удобрение – хорошая пара ботинок. Прогулка по полям дает представление о состоянии сельскохозяйственных культур и почвы и дает своевременное предупреждение о необходимости действий. Необходимо предпринять следующие действия:

1. *Органическое вещество почвы.* Это интегральный показатель плодородия почвы; от него зависит жизнь и здоровье почвы, но в настоящее время органическое вещество чернозема истощается с угрожающей скоростью. Возвращение к залежи не вариант: эти почвы – мировая житница. Зависимость от минеральных удобрений приводит к разрушению органического вещества почвы, но долгосрочные полевые опыты доказали большую степень поглощения углерода и азота в севооборотах, которые включают в себя многолетние бобовые и злаковые травы, щедрое внесение навоза и нулевую или минимальную обработку почвы. Вместе эти практики устанавливают новое, продуктивное равновесие, хотя и с меньшим содержанием гумуса, чем в девственной степи и прерии.
2. *Севооборот.* Это самый дешевый и самый эффективный способ повышения урожайности, плодородия почвы – за счет сокращения потребности в дорогостоящих удобрениях, гербицидах и пестицидах – и прибыли, здоровья населения и окружающей среды. При проектировании севооборотов, мы должны учитывать корневые системы разных культур, которые используют воду и питательные вещества из разных слоев почвы; способность различных культур накапливать плодородие почвы и сдерживать эрозию почвы; их способность конкурировать с сорняками, их устойчивость к вредителям и болезням и необходимость разорвать жизненные циклы этих противников; а также устойчивость к вероятной кратковременной или длительной засухе. Чем больше разнообразие культур и чем лучше севооборот, тем лучше здоровье почвы и тем меньше зависимость от внешних производственных вложений. При наличии достаточного количества навоза механическая обработка почвы может быть заменена биологической обработкой почвы.
3. *Необходимость восстановления плодородия почвы.* Присущее почве плодородие вносит огромный вклад в урожайность, доля плодородия почвы в формировании урожайности составляет 80-98%. Вклад минеральных удобрений в формировании урожайности выше при бессменном возделывании культур, чем в севообороте, что указывает на худшую функциональ-

ность почвы и плохое здоровье корневой системы при бессменном возделывании. В хорошем севообороте дополнительное внесение минеральных удобрений на фоне внесения навоза не эффективно – ни агрономически, ни экономически – по крайней мере, не на черноземе. Лучшее средство – это восстановление здоровья почвы, что может стать отправной точкой для регенерации всей пищевой цепочки: почва – сельскохозяйственные культуры – домашний скот – люди. Это же необходимо и для возрождения сельских общин.

4. *Интеграция земледелия и животноводства позволяет улучшить круговорот питательных веществ и энергии.* Кормовые культуры, особенно многолетние бобовые и злаковые травы, а также органические удобрения повышают плодородие почвы; смешанные фермы, или партнерство между земледельческими и животноводческими предприятиями могут эффективно использовать побочные продукты сбора урожая и переработки в качестве сырья. Как альтернатива, зеленая биомасса может использоваться в специальных анаэробных автоклавах для производства биогаза и органических удобрений собственного производства.

Другой из нас был почвоведом в течение почти шестидесяти лет пешком и на лошадях, на машине *Land Rover* и на лодке, самолете и спутнике наблюдал за почвами с разных точек зрения. Как бы мы ни смотрели на это, там не все одинаково. Некоторые почвы – на крутых склонах, другие – нет; некоторые почвы содержат больше воды, другие – меньше; некоторые соленые, некоторые щелочные, другие – нет.... Культуры безошибочно выявляют эти различия, поэтому имеет смысл вести земледелие с учетом типа почвы. Точное земледелие в моде. Это позволяет избежать расточительного использования химикатов, семян и воды, а также снижает ущерб, наносимый почве и более широкой окружающей среде, но не меняет основы сельскохозяйственной системы, которая зависит от производственных ресурсов и ископаемой энергии.

5. *Консервативное земледелие (КЗ) – это другая парадигма, которая имеет смысл независимо от типа почвы.* Оно сочетает в себе:
- минимальное механическое нарушение почвы или полное его отсутствие, посев непосредственно в обработанную почву, поддержание архитектуры пространства, сведение к минимуму потери органического вещества в почве и поощрение биологического разнообразия почвы – не в последнюю очередь наличие микоризы и дождевых червей;
 - постоянный, проницаемый почвенный покров из сельскохозяйственных культур и растительных остатков, который защищает поверхность почвы от солнца, ветра и дождя и питает биоразнообразие и активность почвы;
 - диверсификацию сельскохозяйственных культур посредством севооборотов или ассоциаций сельскохозяйственных культур, которые контролируют распространение сорняков, вредителей и болезней.

Новая парадигма работает везде по той простой причине, что она устраняет деструктивные нарушения живой почвы из-за вспашки и ежедневного воздействия природных стихийных бедствий. Нам еще многому предстоит

научиться у фермеров, занимающихся органическим земледелием, которые на протяжении многих лет находили способы ведения хозяйства без пестицидов и искусственных удобрений.

6. *Время на стабилизацию, а затем и сокращение концентрации атмосферного CO_2 , который вызывает глобальное потепление и высыхание степей, истекает.* Чернозем обладает огромным потенциалом для улавливания углерода. Принятие более разнообразных севооборотов в степях немедленно уменьшит вдвое выбросы CO_2 в атмосферу, связанные с потерей органического вещества почвы (в настоящее время 1,14 тыс. т в год только в России, Украине и Казахстане). Внедрение всей системы КЗ превратит сельское озяйство из источника парниковых газов в поглотитель, повысит продовольственную безопасность и создаст пространство для альтернативного использования деградированных земель.
7. *Политическая поддержка.* При незначительной политической, научной и материально-технической поддержке или без таковой миллионы фермеров во всем мире приняли КЗ с тем, чтобы добиться значительной экономии времени, техники, топлива и промышленных ресурсов; обезопасить свои почвы от засухи и остановить эрозию; сохранить или повысить урожайность сельскохозяйственных культур, поддерживая экологические услуги. Но они остаются в меньшинстве.

Необходимы радикальные политические инициативы для преодоления барьеров на пути принятия мер по смягчению последствий изменения климата в течение короткого периода времени, оставшегося у нас. Некоторые из них могут быть приняты незамедлительно: например, прекращение субсидий на дизельное топливо для сельского хозяйства и налогообложение на удобрения и пестициды. Доступное продовольствие все еще может быть обеспечено, если фермерам также платить за предоставление экологических услуг, от которых общество полностью зависит, но которые в настоящее время не оплачиваются – не в последнюю очередь – секвестрация углерода и гарантия водоснабжения и качества воды, которые можно оплачивать в виде углеродных кредитов и кредитов «зеленой» воды. Имеются веские основания для инвестиций в инфраструктуру животноводческого сектора, а также для производства и распределения биогаза; есть насущная потребность в новом уровне исследований и разработок междисциплинарными группами, которые могут справиться со сложными задачами в данном направлении.

Все эти вопросы необходимо учитывать при разработке более устойчивых систем ведения сельского хозяйства: фермерство, которое обеспечивает разумные, надежные урожаи и прибыль, и в то же время сдерживает эрозию почвы, восстанавливает плодородие почвы, предотвращает загрязнение окружающей среды и защищает здоровье населения, смягчает изменения климата и способно адаптироваться к тому, что не может быть предотвращено. Это жизненно важно.

Мы слишком хорошо осознаем свои ограничения (недостатки) как сторонники защиты чернозема, но лучшие из его сторонников оставили нам аналогию в Семь Веков Человечества. Переноса это на чернозем, мы видим, что четыре

века молодости и силы были отброшены в сторону с естественной залежи. С чем останемся мы?

«И затем правосудие, разодетое в пух и прах, с хорошим подбитым капюшом, с суровыми глазами и симметрично подстриженной бородой, полное мудрых поговорок и современных примеров; и так оно играет свою роль. Шестой век вошел незаметно в обтягивающих панталонах, с очками на носу и с сумкой на боку; его юношеские носки, хорошо сохранившиеся, но слишком широкие для его сморщенных голений; и его сильный мужественный голос, чередующийся с детским дискантом, с трубными звуками и свистом. Последняя сцена всего, которая заканчивает эту странную, насыщенную событиями историю, – это второе детство и простое забвение, без зубов, без глаз, без вкуса, без всего».

Какой из этих возрастов будет нашим, зависит от того, как мы относимся к нашей почве и как мы относимся к нашим фермерам.

ИНДЕКС

А

Австралия, 58, 107, 112, 132, 145
Австрия, 33, 140
Агрохимикаты, 1, 2, 149, 150
Агроэкология, 5, 20, 21, 23, 26-29, 189, 198
Агроэкосистема, 20, 23-27, 44, 113, 177, 201
Агроресоводство, 35, 43, 87
Агрегаты, стабильность агрегатов, 2, 39, 41, 44, 50, 51, 68, 82, 115, 123, 132, 141-143, 200
Азот, 10, 12, 14, 15, 20, 23-25, 27, 37, 41, 46, 47, 50, 51, 56, 57, 59, 67, 68, 71-74, 77-79, 82, 83, 86-90, 93, 94, 97-99, 104, 107, 112-116, 122, 124, 135, 139, 140, 142, 143, 160-163, 173, 174, 176, 177, 180, 182, 187, 206
Азот, N, 37, 41, 46, 47, 50, 51, 56, 57, 59, 67, 68, 71-74, 77-79, 82, 83, 86-90, 93, 94, 97-99, 104, 107, 112-116, 122, 124, 125, 128, 130, 140, 143, 145, 147, 149, 153, 160-163, 173, 174, 176, 177, 180, 182, 187, 188, 206
Айова (штат в США), 115, 151
Алберта, 60, 199, 202
Алелопатия, 20, 122, 124
Анализ жизненного цикла, 21, 89
Антропоцен, 42
Аргентина, 205
Асков, опытная станция, Дания, 4, 177
Ассоциация нулевой обработки тропиков (Бразилия), 131

Б

Бактерии, 2, 34, 51, 88, 114, 162
Бассейн Амазонки, 88
Без обработки, нулевая обработка, 2, 16, 56, 58, 60, 82, 84, 87-89, 129-131, 133, 134, 139-142, 145, 148, 149, 153, 160, 188, 189, 191, 197, 199, 204
Безопасность, 7, 21, 23, 43, 87, 88, 95, 148, 188, 191, 193, 195, 197-199, 201-203, 205, 208
Безотвальная обработка почвы, 122, 131, 133-139, 152, 179
Бельцкие степи, 24, 47, 58, 61, 62, 64, 90, 96, 129, 152, 157, 184, 192, 194, 228

Беспахотное земледелие (No-till, zero-till), 16, 135
Бессарабия, бывшая провинция России, в настоящее время это Республика Молдова и часть Украины, 128, 132
Бессменное культивирование (монокультура), 5, 95, 120, 156
Биогаз, 114, 138, 153, 187, 199, 207, 208
Биология, 12
Биоразнообразие, 23, 24, 26, 27, 34, 42, 57, 87, 95, 120, 146, 149, 150, 182, 204, 205, 207
Биота, 2, 12, 50, 51, 73, 139, 143, 148, 151, 162
Биотехнология, 28
Болгария, 32, 33

В

Великие равнины, 15, 131, 140
Венгрия, 133
Вергилий (Публий Вергилий Маро), 132
Вика *Vicia Sativ*, 71, 100, 109, 134, 135, 170, 175, 176
Висконсин (США), 115
Владимир Ульянов (Ленин), 13
Внесение удобрений, 15, 33, 39, 77, 101, 97, 123, 136, 157, 170
Вода, 3, 4, 10, 12, 14, 20, 22, 27, 32, 35, 49, 52, 88, 104, 105, 110, 123, 131, 146, 158, 159, 163, 167, 182, 184, 189, 200, 204-206
Рамочная директива по водным ресурсам (ЕС), 27
Водно-болотные угодья, 58, 189
Водные ресурсы, 9, 85, 114, 199, 200
Водоёмы, 14, 16, 35, 36, 146
Водоснабжение, 1, 34, 131, 205, 208
Водоудерживающая способность, 95, 117, 178
Водяной пар, парниковый газ, 57, 67
Воздействие на окружающую среду, 22, 23, 158, 184
Восстановление, 9, 10, 12, 13, 17, 35, 43, 58, 61, 79, 96, 105, 112, 113, 124, 145, 158, 159, 162, 176, 180, 189, 201, 202, 206
Вредители, 5, 8, 10, 16, 21-24, 26, 27, 32, 34, 39, 85, 88, 89, 93-97, 99, 105, 120-124, 139-131, 133, 136, 146-148, 150, 152, 153, 161, 171, 179, 206, 207

Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии, г. Курск, 192
 Вспашка, 2, 5, 10, 12, 13, 15, 16, 31, 34, 38, 43, 51, 52, 60, 74, 82, 86, 89, 116, 122, 129-141, 144, 145, 147, 149, 151, 152, 162, 189, 193, 197, 207
 Выброс (выбросы) парниковых газов, 9, 43, 56, 57, 74, 86-88, 87, 90, 95, 99, 107, 116, 146, 148, 188, 199, 201
 Выбросы, 9, 43, 56-58, 74, 85-90, 99, 107, 113, 114, 116, 146, 148
 Выщелачивание, 44, 82, 88, 113, 140, 148, 149, 177
 Выщелоченный, 11

Г

Генетически модифицированные культуры, 99, 149
 Генная инженерия, 27, 28
 Гербициды, 16, 24, 86, 115, 122, 129, 131, 145, 146, 148-151, 153, 158, 206
 Германия, 33, 174
 Глифосат, 16, 131, 148-151, 153
 Глобальное потепление, 22, 44, 57, 87-89, 105, 113-115, 188-190, 193, 196, 202, 208
 Глобальный тепловой потенциал, 27, 115
 Горох *Pisum sativum*, 70, 87, 107, 108, 115, 118, 121, 122, 138, 179
 Грибы, 2, 34, 43, 44, 51, 88, 103, 122, 123, 139, 148, 150, 161, 162, 171
 Грунтовая вода, 1, 144, 150, 177, 201
 Гумификация, 10, 41, 79, 112
 Гумус, 10, 11, 15, 32, 36, 43, 44, 54, 55, 58, 59, 68, 82, 130, 144, 147, 160, 161, 162, 191, 192, 193, 196, 206

Д

Деградация, 7, 8, 14, 22, 25, 31, 34, 35, 37, 49, 50, 52, 56, 58, 87, 95, 140, 143, 153, 189, 197, 199, 205
 Деградация земель, 7, 22, 35, 37, 49, 56, 58, 87, 143, 199
 Дешевая продовольственная политика, 6, 189
 Директива по нитратам, 27
 Доступное жилье, 199
 Доступные питательные вещества (NPK), 38, 39, 59, 100, 123, 160, 168

Директивы, 27
 Дыхание, 41, 116

Е

Европа, 4, 8, 28, 85, 88, 114, 145, 157, 169, 182, 205
 Европейский Союз, 27, 28, 89
 Емкость катионного обмена, 39, 142
 Естественная растительность, 10, 43, 46, 49, 120, 130

Ж

Животноводство, 2, 9, 13, 16, 21, 22, 27, 28, 44, 87, 123, 138, 158, 159, 176, 178, 182, 184, 197, 204, 207

З

Заболачивание, 34, 130
 Загрязнение, 22, 25, 26, 34, 95, 114, 146, 150, 153, 178, 204, 208
 Загрязнение окружающей среды, 5, 20, 146, 208
 Залужение водных потоков, 15, 119
 Запасы доступной воды, 31, 32, 39, 43
 Запасы ОВП под разными системами земледелия, 10, 85, 89, 153
 Заселение, 34, 36, 85
 Засуха, 10, 14, 16, 31, 35, 36, 41, 49, 50, 52, 85, 96, 99, 105, 107, 110, 111, 115, 116, 119, 124, 125, 129, 131, 139, 141, 144, 148, 151, 158, 159, 163, 166, 167, 184, 189, 201, 206, 208
 Засушливые земли, 87, 107, 116, 157, 169
 Защита, 5, 15, 17, 52, 68, 84, 105, 117, 119, 120, 128, 141, 142, 151, 152, 199-201, 208
 Здравоохранение, 23, 26, 161
 Зеленые облигации, 200
 Зеленое финансирование, 201
 Землепользование, 9, 31, 33, 34, 36, 37, 39, 42, 43, 47, 49, 51, 53, 56, 57, 85, 190, 191, 193
 Здоровье, 1, 3-5, 8, 17, 20, 21, 23, 26, 28, 29, 38, 39, 41, 93, 120, 123, 125, 146, 149, 150, 160, 161, 189, 190, 198, 205-208
 Злаки двойного назначения, 182
 Знания фермеров, 21

И

Известь, известкование, 145, 174
 Изменение в землепользовании, 34, 56, 57, 85, 190, 191, 193
 Изменение климата (глобальное потепление), 35, 55-59, 61, 63, 65, 67, 69, 71, 73, 75, 77, 79, 81, 83, 85, 87, 89, 91, 110, 116, 143, 173, 189, 196, 199, 200, 208
 Имитация природных экосистем, 21, 27, 205
 Индекс здоровой фермы, 41
 Институт почв, Салина, Канзас (США), 113
 Интеграция земледелия и животноводства, 16, 178, 197, 204, 207
 Инфильтрация, 1, 15, 16, 34, 41, 43, 47, 50, 117, 125, 131, 133, 141, 142, 144, 146, 148, 178
 Ископаемое топливо, 6, 56, 57, 88, 183, 190
 Исследования, 1, 2, 5, 9, 10, 14, 25, 28, 37, 42, 49, 54, 60, 93, 103, 112, 116, 120, 122, 128, 132, 140, 148, 149, 156, 159, 171, 183, 201, 204, 208
 Истощенные почвы, 114

К

Казахстан, 32-34, 36, 188, 196, 197, 208
 Калифорнийский университет в Беркли (США), 27
 Канада, 10, 15, 32, 33, 49, 56, 58, 60, 99, 116, 121, 140, 141, 191, 199, 205
 Канзас (США), 37, 141
 Качество, 5, 9, 10, 12, 14, 15-17, 21, 23-25, 28, 29, 31-35, 37-39, 41-43, 45, 47, 49, 51-53, 57, 59, 66, 68, 72, 84, 86, 88-90, 93, 95-99, 105, 112-116, 121, 123, 130, 131, 138, 142, 144, 145, 147-153, 160, 161, 180-184, 190, 191, 198, 201, 206-208
 Каштановая почва, 13, 34, 225
 Квинсленд, 58
 Кислотность почвы, 41
 Китай, 32-34
 Киотский протокол РККИ ООН 1997, 2012, 57, 89
 Клевер, 59, 60, 79, 94, 105, 121, 174
 Консервативное земледелие, 130, 131, 143, 146, 152, 153, 183, 188, 199, 204, 207
 Конопля, 122
 Контурное возделывание культур, 15
 Кормовые культуры, 36, 94, 112, 116, 118, 158, 159, 178, 182, 184, 207
 Корневые экссудаты, 49, 51, 68, 70, 114, 115, 121

Корни, 10, 12, 32, 39, 41, 43, 44, 49-52, 68, 70, 71, 73, 74, 82, 87, 88, 94, 103, 105, 112, 114, 118, 121, 129, 139, 141, 144, 162, 177
 Коэффициент дефляции, 142
 Кредиты на зеленую воду, 200
 Крестоцветные, 121
 Кротовины, 224
 Круговорот питательных веществ, 8, 20, 22, 24, 25, 27, 42, 44, 140, 157, 159-161, 163, 165, 167, 169, 171, 173, 175, 177-181, 183, 185, 187
 Круговорот энергии и питательных веществ, 142
 Культуры сплошного посева, 36, 94, 118, 119, 122, 125
 Кукуруза, 36, 38-40, 45-48, 59, 62-67, 69-71, 73, 79, 93, 97-111, 115-118, 127, 135, 138, 157, 163-171, 173-179, 184, 195

Л

Лесоводство, 87
 Ливневые осадки, 84
 Луг, 14, 31, 32, 36, 37, 43, 52, 59, 60, 87, 89, 118, 188, 191, 92
 Лэнг Тим, 161
 Люцерна, 36, 44, 45, 47, 60, 61, 66-68, 70-72, 90, 94, 105-114, 116, 121, 125, 135, 136, 138, 163-166, 169, 178-180, 193

М

Мадридская декларация 2001, 16, 18
 Макроэлементы, 142
 Мезофауна, 34
 Механизация, 22, 41, 95, 105
 Миграция, 22, 35
 Микробная биомасса, 41, 43, 49, 59, 87, 115, 116, 142, 143, 148, 150, 162, 177
 Микроэлементы, 7, 142, 145
 Микрофлора, 123, 156
 Микроорганизмы, 2, 8, 14, 43, 49, 59, 70, 114, 120, 122, 142, 162, 178, 187
 Минералогия, 32
 Минерализация, 3, 6, 10, 14, 31, 48, 49-52, 57, 59, 68, 72, 73, 84, 89, 99, 112, 113, 129, 140, 142, 157-159, 162, 167, 169, 176, 177, 184, 197, 205
 Минерализация почвенного органического вещества, 86, 167, 176
 Минимальная обработка почвы, 133, 141, 206
 Многолетняя злаковая растительность, 31

Многолетние полевые опыты, 2, 14, 31, 82, 105, 112, 143, 163, 174, 177
 Многолетние травы, 10, 21, 27, 44, 68, 74, 82, 110, 112-114, 118, 129, 136, 145
 Многолетние бобовые, 5, 10, 13, 27, 36, 44, 59, 60, 70, 87, 89, 110, 112, 114, 116, 118, 121-122, 136-138, 145, 148, 158, 162, 163, 166, 167, 178-180, 184, 190, 204, 206,
 Многолетние поликультуры, 122
 Многолетний райграс, 71, 135, 136, 138, 151, 178, 179
 Монтана, 107
 Мульча, 2, 12, 14, 16, 50, 117, 130, 131, 142, 144-147, 151, 204

Н

Навоз (органическое удобрение), 1, 4, 5, 12-14, 17, 31, 32, 37, 43, 44, 46, 47, 51, 52, 59, 61-69, 71, 73-84, 90, 94, 15, 112, 132, 135, 136-139, 153, 158, 162, 166-171, 173-182, 184, 191, 192, 194, 197, 204, 206, 207
 Навоз с фермы, 171, 174
 Накопление, 16, 25, 26, 34, 51, 59, 61, 66, 74, 87, 103, 107-109, 114, 115, 123, 125, 141, 163, 167, 197
 Насыщенность основаниями, 32
 Насыщение углеродом, 58
 Нефть, 2, 6, 27
 Нидерланды, 13, 182
 Норфолкский 4-хпольный севооборот, 94, 182

О

Объемная масса, 39, 49, 60, 134, 139, 142, 152, 192
 Общая аграрная политика (ЕС), 27, 89, 120
 Общая сельскохозяйственная политика, 89, 120
 Овес, 59, 70, 79, 85, 89, 93, 97-102, 107, 108, 112, 122, 134, 135, 146, 169, 170, 174-176, 178
 Однолетние культуры, 37, 43, 56, 82, 89, 112, 113, 133, 167
 Однолетние бобовые, 114-116, 118, 138
 Окуривание (дезинфекция), 116
 Определение проблемы, 204
 Органическое земледелие, 151, 161
 Органическое вещество почвы (ОВП), 2, 6, 10, 14, 15, 31-34, 41-44, 46-52, 58, 59, 60, 67, 70, 72-74, 79, 81, 82, 84-90, 115, 116, 134, 135,

142-144, 153, 162, 190, 191, 205
 Орошение, 1, 5, 22, 33, 56, 79, 81-84, 88, 90, 158, 190
 Остатки растительные, 2, 14, 16, 20, 21, 27, 41, 44, 47, 48, 50, 51, 58, 67, 69, 72, 73, 79, 84, 86, 87, 89, 113, 114, 116, 120, 121, 130-132, 134, 139, 145, 148, 151-153, 160, 167, 169, 177, 189, 204, 207
 Освоение целинных земель 1954-1963, 13, 36
 Отношение C:N, 14, 43, 47, 48, 51, 67, 68, 71, 79, 80, 82, 84, 87, 113, 142
 Отходы, 8, 42, 50, 95

П

Пампасы, 12, 34, 201, 205
 Паразитизм, 23
 Парижское соглашение, Рамочная конвенция ООН об изменении климата 2016, 9, 19, 35, 89, 190,
 Парниковые газы, 9, 56, 57, 74, 86, 87, 99, 107, 116, 148, 149, 188, 199, 201
 Патогены, 26, 27, 114, 120-122, 148, 178
 Пашня, пахотный, 2, 14, 15, 26, 28, 33-37, 43, 46, 50, 56, 58, 59, 82, 94, 95, 117, 128, 132, 139, 140, 144, 147, 156, 178, 182, 187, 188, 190, 192, 196, 197, 199, 205
 Пестициды, 1, 6-8, 20-22, 24-27, 34, 39, 42, 56, 74, 87, 93, 95, 105, 114, 115, 124, 130, 132, 133, 148-150, 159, 206
 Питание растений, 14, 15, 99
 Платежи за экологические услуги, 198
 Плодородие, 2, 9, 10, 12, 13, 17, 26, 31-33, 37, 42, 43, 47, 49, 55, 59, 72, 79, 89, 92, 93, 96-105, 112, 113, 124, 132, 133, 135, 138, 140, 143, 145, 146-148, 151, 152, 156-163, 165, 167, 169, 171, 173, 175-189, 192, 204-207
 Плотнянская опытная станция, 127
 Плуг отвальный, 12, 57, 90, 131-135, 179, 193
 Плуг чизельный, 15
 Плужная подпочвенная подошва, 16, 129-131, 134, 144, 151
 Поверхностная корка, 130, 142
 Поверхностная температура, 78, 84, 136, 137
 Поверхностное покрытие почвы, 16, 44, 204
 Повестка дня 2030, Повестка дня ЕС по Устойчивому развитию, принятая в 2015г., 7, 9, 19, 35, 190, 196, 199, 203.
 Подвижная фракция, 32, 44, 46-49, 59
 Подвижный, 25, 32, 44, 46-49
 Подсолнечник, 5, 6, 36, 38, 39, 40, 70, 71, 93, 97,

103-105, 107, 110, 111, 118, 121, 123, 124, 135, 157, 158, 169, 171-174, 179, 184

Покровные культуры, 27, 44, 88, 97, 113, 115, 117, 121, 131, 141, 147-151, 182, 183

Политические инициативы по поддержке устойчивого земледелия, 208

Польша, 33

Пополнение (воды), 94, 105, 144, 150, 158, 166, 167, 184, 201

Популяция людей, 1, 7, 206

Потребление, 6, 9, 21, 23, 44, 57, 86, 87, 89, 96, 99, 110, 111, 113, 114, 134, 158, 162-165, 197

Почвенный органический углерод, ПОС, 34, 49, 56, 57, 59, 86, 95, 157, 163, 167, 176, 187, 189

Почвенный покров, 15, 21, 35, 130, 141, 144, 154, 149, 207

Принципы севооборота, 93

Природные экосистемы, 16, 20, 21, 24, 25, 27, 85, 96, 189, 204, 205

Проблема нулевого голода, ЕС 2012, 35

Продукты в пищевой цепочке цены, 51, 89, 149

Производство, 1, 7, 8, 9, 13, 21, 22, 23, 26, 28, 29, 30, 74, 84, 86-90, 95, 96, 110, 113, 114, 130, 138, 143, 153, 158-160, 178-180, 182, 183, 188, 189, 197-199, 201, 202, 204-208

Промышленный вклад (инпут) в системы земледелия, 2, 6, 7, 20, 21, 24, 32, 44, 52, 56, 74, 85, 90, 95, 121, 140, 145, 146, 158, 159, 178, 188, 191

Проницаемость, 32

Пропашные культуры, 36, 45-47, 61-69, 72, 73, 94, 112, 118, 119, 125, 164-168, 192-197

Просо, 87, 115, 122, 143, 146

Проезжимость, 135

Прямой посев/высадка, 131

Пшеница 5, 6, 14, 38-40, 45-48, 56, 58-67, 69, 81, 84, 87, 88, 93, 94, 97-112, 115, 118, 120-122, 124, 125, 136-138, 140, 147, 151, 157, 158, 163-169, 171-176, 178, 179, 184, 193, 195, 197, 205

Пыльная буря, 13, 15, 35, 36

Пыльный ураган, 33

Пырей ветвистый, 57

Р

Размер фермы, 7

Разнообразие, 8, 16, 17, 20-28, 32, 34, 35, 39, 51, 52, 59, 87, 95, 96, 104, 116, 117, 120, 123, 124, 148, 151, 160, 183, 207

Разрушение дерна, 10, 31, 56, 58

Разрыв между потенциальным и реальным урожаем, 83

Ранозубируемые/позднотубируемые предшественники, 73, 93, 94, 97, 99, 101, 103, 105, 107, 108, 110, 121, 124, 138

Растения: питательные вещества, 4, 33, 39, 44, 52, 59, 114, 123, 129-131, 139, 158-161, 168, 182, 184, 206

Реакция на удобрения, 101, 103, 157, 159, 169, 184

Реакция почвенного раствора pH, 36

Рейнер Джеффри, 161

Республика Молдова, 5, 6, 11, 19, 32, 33, 36, 37, 55, 58, 90, 92, 96, 117, 128, 132, 147, 156, 176, 178, 186, 188, 190, 192, 196, 197, 203

Риверина (Австралия), 108

Рожь, 72, 97, 105-107, 109, 146, 151, 174, 177

Россия, 14, 19, 32-37, 43, 55, 132, 140, 156, 157, 162, 169, 187, 188, 191, 192, 194, 196, 197, 205, 208

Румыния, 32, 33, 140

С

Санборн Филд, Университет Миссури, Колумбия, 5, 10, 59, 60, 79

Саскачеван, 116, 143

Сахарная свекла, 5, 6, 38-40, 70, 71, 93, 100-102, 104, 105, 107, 110, 111, 118, 122, 124, 135-138, 143, 157, 158, 163-166, 169, 172, 173, 175, 178, 179, 184

Сахарный тростник, 96, 143

Севооборот, 2, 5, 8, 10, 13, 14-17, 19, 21, 22, 26, 31, 32, 35-40, 43, 44, 46-48, 55, 56, 59-80, 82, 86-88, 90, 92-103, 107-117, 119-125, 128, 130-139, 141, 144-153, 156-160, 162-174, 176, 178-184, 188-197, 199, 201, 203, 206, 208

Секвестрация углерода (улавливание), 22, 24, 34, 50, 57-59, 73, 74, 88, 89, 95, 115, 140, 141, 146, 148, 188-191, 197, 199-201

Селекция растений, 42, 188

Сельская регенерация, 190

Сельские общины, 2, 6-8, 16, 95, 125, 188, 202, 204, 207

Сельскохозяйственная засуха, 110

Сербия, 33

Серрадо, 16, 150

Сжигание ископаемого топлива, 56, 57, 190

Система, 2, 3, 7, 9, 15, 21, 24, 27, 32, 43, 58, 75-80, 84, 87, 89, 94-96, 112, 114-116, 125, 128, 129, 131, 135, 137-139, 142, 143, 145, 147-153, 155,

156, 158, 169, 171-174, 182, 187-189, 192, 193, 198, 202

Системы земледелия, 16, 17, 24, 35, 44, 46, 58, 59, 82, 87, 88, 95, 105, 116, 132, 133, 147, 148, 152, 156, 188, 190, 205

Системы промышленного земледелия, 30

Скручивание, сдавливание, 146

Словакия, 33

Соединенные Штаты Америки (США), 6, 14, 15, 28, 31, 32, 34, 35, 41, 58, 60, 79, 104, 107, 113, 129, 131, 140-142, 162, 174, 199, 205

Сорго, 87, 115, 121, 122

Сорняки, 4, 5, 8, 10, 12, 16, 24, 27, 39, 41, 52, 74, 90, 93-97, 99, 105, 120-124, 129-131, 133, 136, 141, 144-153, 179, 204, 206, 207

Сохранение, 2, 15, 31, 35, 41, 58, 120, 130, 131, 133, 144, 150, 153, 162, 197, 205

Социальные услуги, 3, 42, 84, 88, 89, 96, 99, 205

Союз Советских Социалистических Республик, СССР, 1922-1991, 1922-1991, 6, 11, 13, 31, 36, 37, 54, 55, 133, 163, 186, 187, 190

Соя, 103, 104

Специальный (отчет) доклад ЕС о праве на питание, 2017 г., 26

Способность подавлять болезни, 121

Сталинский план преобразования природы, 14, 36

Степи, 14, 19, 24, 25, 31, 32, 35, 36, 46, 47, 49, 52, 55, 58, 61, 62, 64, 90, 94, 96, 124, 129, 132, 140, 152, 156, 157, 184, 191, 192, 194, 206

Степная растительность, 37, 162

Структура, 1-3, 10, 12-16, 21, 24, 27, 28, 31-33, 35-37, 39, 41, 43, 47-52, 59, 82, 84, 88, 114-117, 124, 129, 132, 134, 140, 142, 145, 146, 148, 151, 171, 178, 189, 192

Схема компенсации выбросов углерода в Алберте, 58

Т

Таяние снегов, 3, 94, 117, 130

Текстура, 39, 68, 117, 140, 145

Типичный, 11, 14, 15, 24, 46, 47, 51, 61, 62, 64, 67, 69, 70, 73, 75-80, 84, 90, 96, 119, 129, 134, 139, 140, 152, 157, 169, 184, 192, 194

Томас Уильям Кук из Норфолка, 1-й Граф Лестер, 120

Торговля, сделка, 57, 198, 199, 205

Точное земледелие, 25, 207

Тимофеевка (луговая), 59

Трансгенные культуры, 28

Транснациональные компании, 9, 28

У

Углекислый газ CO₂, парниковый газ
концентрация в атмосфере, 4, 57, 81, 193

Углерод микробной биомассы, 41, 43

Углеродные кредиты, углеродные компенсации, 58, 199, 200

Углеродный след, 86, 87

Уголь, 3, 6, 88

Удобрения (минеральные удобрения), 1, 3, 5, 6, 10, 12-14, 24, 37, 66, 70, 73, 74-80, 86, 89, 90, 93, 95, 97-99, 101, 103, 105, 112-116, 121, 124, 132, 133, 135-139, 144, 145, 147, 148, 152, 156-160, 162, 168, 169, 171-179, 181, 188, 192, 193, 196, 206, 207, 208

Украина, 13, 32-34, 36, 132, 133, 140, 156, 188, 191, 196, 197, 205, 208

Универсальное уравнение потери почвы, 116

Университет Линкольна, Небраска, 41

Университет штата Вашингтон, Пуллман (Палус), Вашингтон, 120

Университет штата Северная Дакота, 141

Уплотнение, 34, 41, 50, 87, 123, 133, 139, 141, 142, 145, 147

Управление, 2, 5, 9, 16, 22, 24, 26, 35, 41, 43, 87, 88, 117, 120-122, 124, 131, 150, 200

Упругость, 10

Урожай, 3, 5, 10, 12, 14, 27, 31, 39, 47, 93, 94, 97, 100-102, 104, 113, 124, 128, 130, 136, 138, 144, 146, 157, 158, 163, 171, 173, 175, 177, 188, 208

Урсу Андрей, 191

Условия возврата, 89, 92, 119

Усталость, 96

Устойчивое земледелие, 86, 94

Устройство террас, 14, 125, 126

Ф

Фермеры, 2, 9, 15, 16, 20, 21-24, 26, 28, 31, 32, 35, 39, 41, 44, 52, 58, 74, 84, 88, 89, 94, 95, 97, 116, 117, 129-133, 144-147, 149-151, 153, 198, 200, 201, 204-206, 208, 209

Фермерский сектор, 7

Фиксация, 20, 23, 41, 56, 86, 90, 115, 124, 130, 148, 162, 180

Формирование урожая, 12, 52, 101, 148, 159, 167, 184

Фотосинтез, 2, 6, 57

Формирование, 6, 10, 12, 27, 32, 42, 44, 51, 52, 93,
97, 98-104, 112, 124, 148, 158, 159, 167, 169,
175, 176, 184

Фундуля, Национальный сельскохозяйственный
Институт исследований и развития,
Румыния, 140

Х

Хрущев Никита Сергеевич, 13, 36, 163

Хищничество, 23

Ц

Цены фермеров на сельхозпродукцию, 113, 175

Цели в области устойчивого развития, ООН
2015, 7, 9, 35, 190

Центрально-Черноземный Государственный
биосферный заповедник им. В.В. Алехина, 192

Ч

Чако, 23, 34, 205

Чешская Республика, 33

Черная земля, чернозем, 2, 10-19, 24, 31-37,
42, 43, 46-51, 54-56, 59-70, 75-84, 88-90, 99,
116, 119, 129, 134, 139, 140, 143, 152, 156,
157, 159, 162, 169, 180, 184, 186, 188-203,
205-208

Черный пар, 45, 46, 48, 57, 62-69, 73, 84, 107-109,
125, 164, 165, 167, 184, 194

Чернозем коричневый (каштановый), 60

Чистая первичная производительность, 34

Э

Эвкалипт, 143

Эквивалентная масса почвы (объемная), 129,
134, 152

Экологические услуги, 8, 22, 130, 144, 153, 198,
205, 208

Экосистемные услуги, 2, 3, 24, 26, 27, 31, 33, 34,
38, 42, 50, 52, 84, 88, 96, 99, 148, 159, 200, 201,
205

Экспериментальная станция Ротамстед,
Харпенден, Хартфордшир, 2, 4, 37, 42, 51,
177, 191

Экспорт, 114, 189, 197, 205

Энергетические культуры, 96

Энергетический баланс (в системах
земледелия), 45, 96, 117

Эрозийность, вымывание, 117

Эрозия, 43, 50, 82, 84, 85, 86, 88, 94-97, 105,
116-119, 123-125, 128-132, 134, 140, 141,
144-149, 148, 150, 153, 159, 161, 163, 178,
192, 196, 197, 206, 208

Эффект севооборота, 93, 94, 104, 124

Эффективность использования воды, 98, 99,
125, 140

Эффективность использования, 14, 39, 72, 95,
99, 107, 115, 125, 140, 144, 148, 157, 173

Эффективность использования питательных
веществ, 148, 157, 158, 174

Эффективность использования энергии, 95

Я

Ячмень, 70, 94, 105, 121, 134, 135, 169, 170-172,
175, 176, 178, 184, 197



Рисунок 01. Чернозем – полный профиль *типичного чернозема* с толщиной верхнего слоя более чем 70 см с выраженными кротовинами и ходами дождевых червей, уходящими в глубокие слои почвы

а)

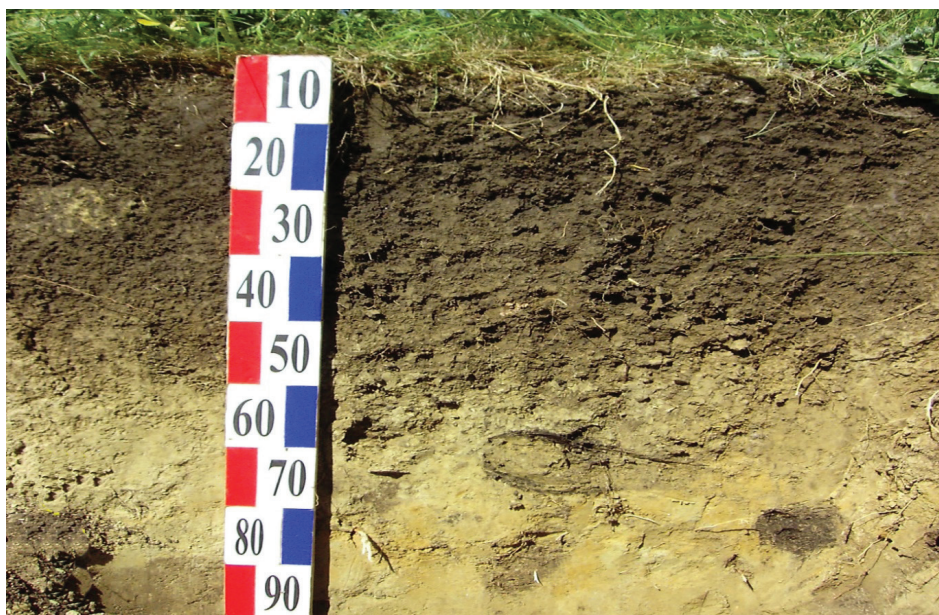


Рисунок 02 а. Эродированный чернозем. Уменьшенная мощность верхнего слоя до 50 см и 30 см соответственно; в последнем проникновение корней отражено до 50 см почвенного профиля.

6)

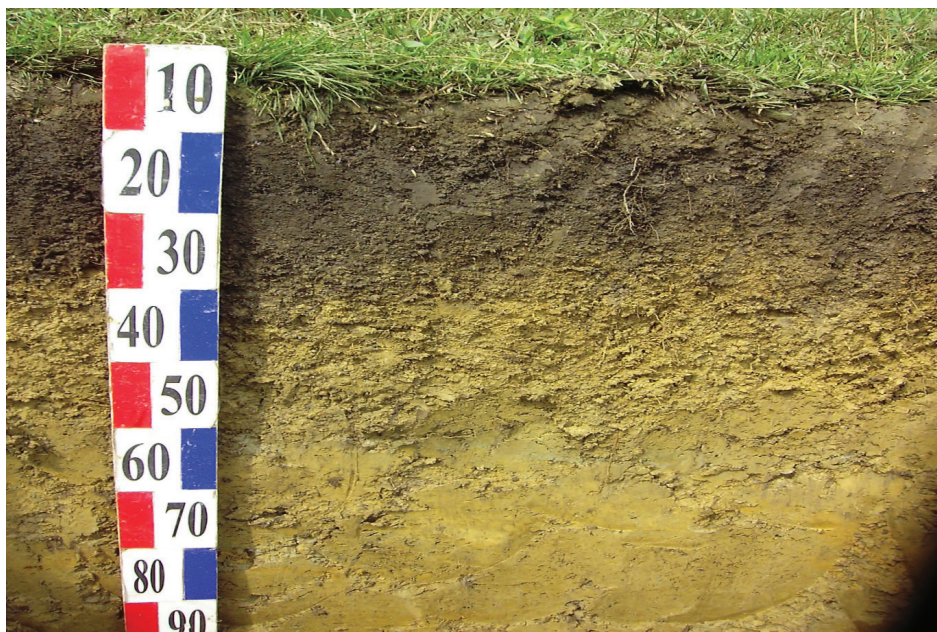


Рисунок 02 6. Эродированный чернозем. Уменьшенная мощность верхнего слоя до 50 см и 30 см соответственно; в последнем проникновение корней отражено до 50 см почвенного профиля.

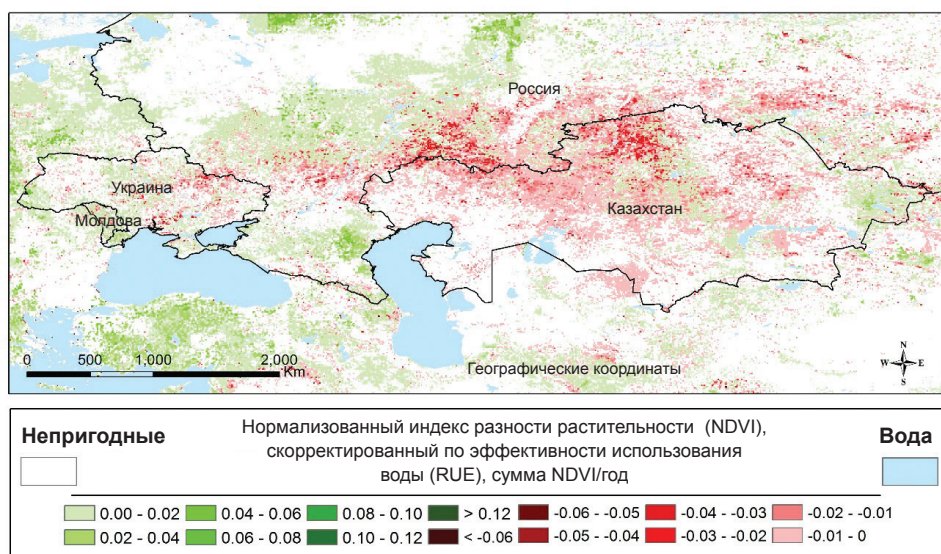


Рисунок 03. Снижение продуктивности степей, 1981–2015 гг., по Bai и др. Изменения в NDVI, учитывая засухи, с корректировкой эффективности использования дождевой воды. Ареалы со сниженным индексом почти полностью совпадают с распространением черноземных и каштановых почв.

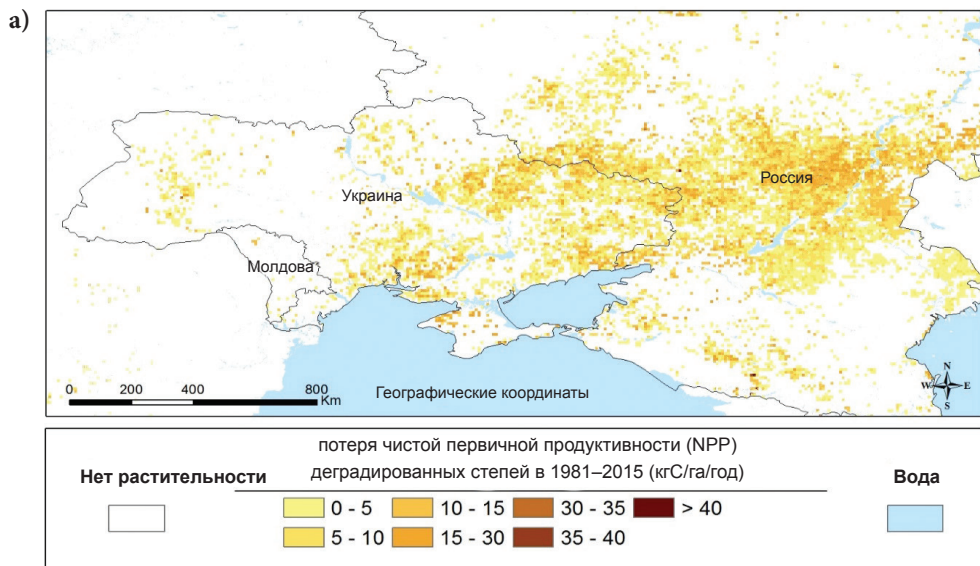


Рисунок 04, а. Потери и прирост первичной продуктивности в европейской степи 1981–2015 гг.

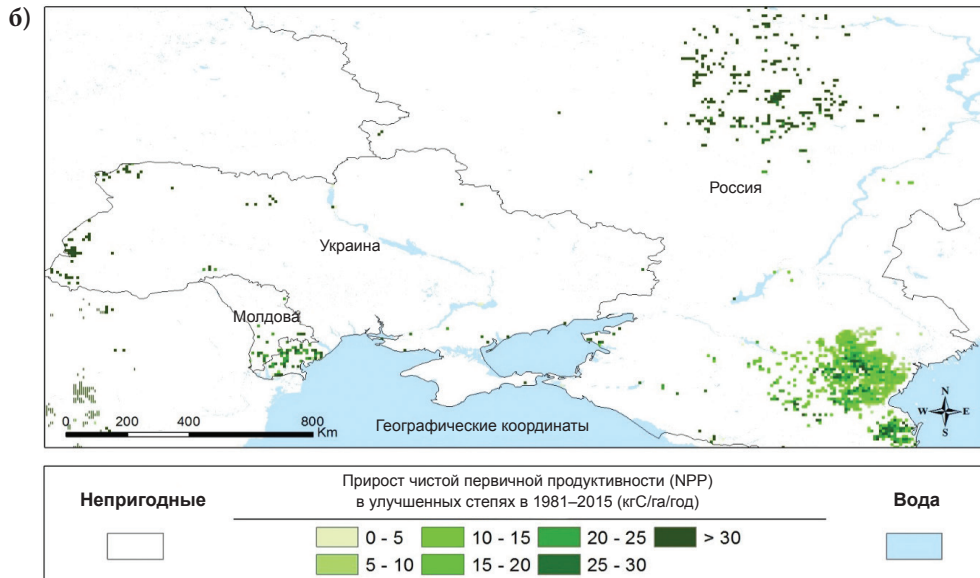


Рисунок 04, б. Потери и прирост первичной продуктивности в европейской степи 1981–2015 гг.



Рисунок 05. Долгосрочные тенденции и прогнозы мировых цен на продовольствие, по Brooks (2017).

Цены на сырую нефть 1861–2017

\$ за баррель

Мировое событие

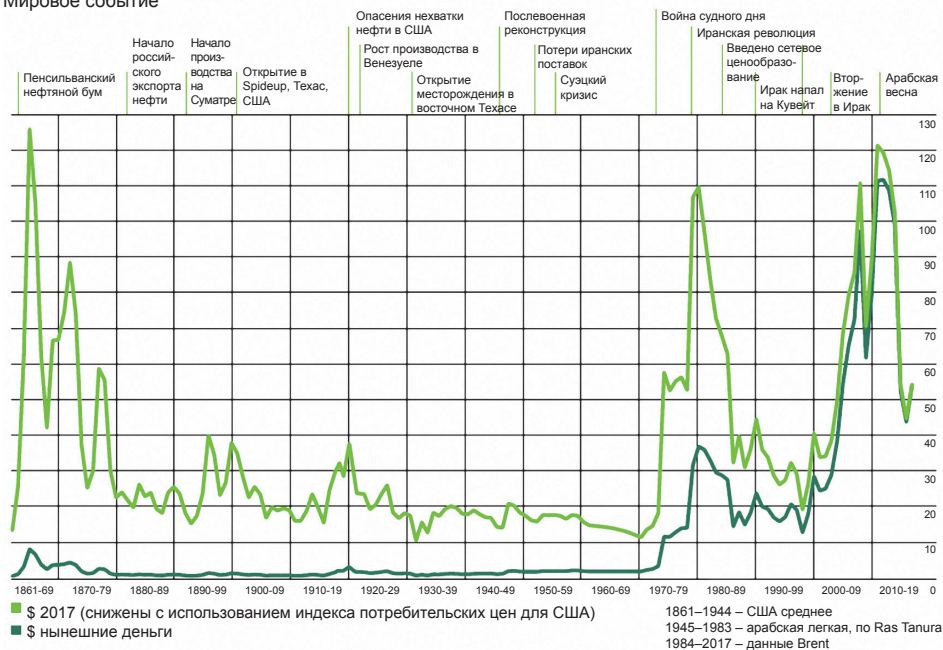


Рисунок 1.1. Мировые цены на сырую нефть. Источник: Статистический обзор мировой энергетики, 2018, British Petroleum, Лондон.



Рисунок 5.1. Типичный чернозем Бельцкой степи. Профиль почвы включает 70-80 см чернозема с зернистой структурой и обильными тонкими корнями; более 30-40 см, смешанный с норками дождевых червей и слепышей, с карбонатным псевдомицелием, также хорошо укоренившимся; на пористом желтовато-коричневом лессе.



Рисунок 5.2. Длительный полевой опыт по севооборотам и бессменным культурам весной.



Рисунок 5.3. Длительный полевой опыт по севооборотам и бессменным культурам при уборке урожая.



Рисунок 5.4. Залежь в длительном полевом опыте по севооборотам и бессменным посевам культур.



Рисунок 5.5. Звено севооборота: озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза на зерно в длительном многофакторном опыте.



Рисунок 5.6. Дождевые черви в почве под однолетней смесью бобовых (слева) и под смесью многолетних бобовых и злаковых трав (справа). Наглядный пример значительного улучшения структуры почвы под многолетними культурами.



Рисунок 5.7. Активные клубеньки на корневой системе люцерны – признак здоровой почвы.



Рисунок 5.8. Озимая рожь с полосой календулы для лучшей «борьбы» с вредителями.

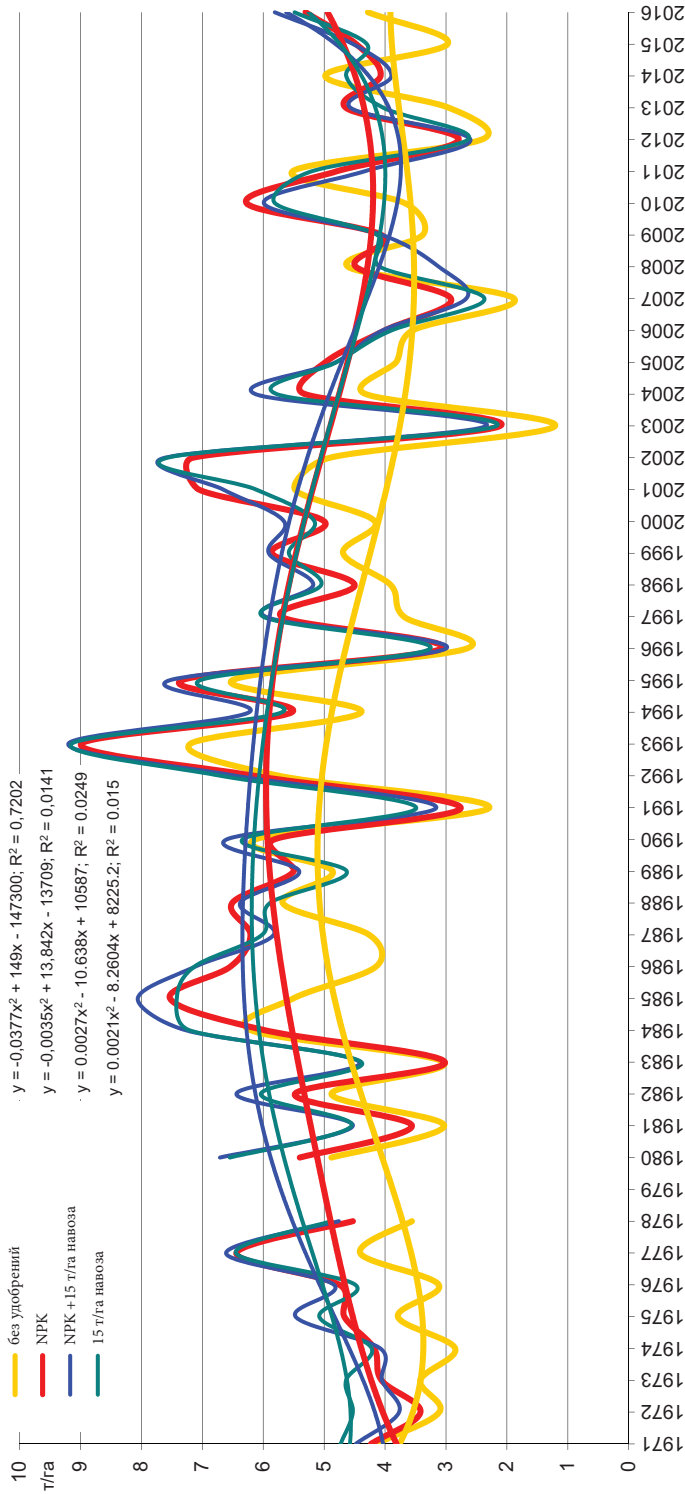


Рисунок 7.1. Урожай озимой пшеницы при различных системах удобрения в севообороте, 1971-2016, НИИПК *Selecția*, Бельцы, Молдова

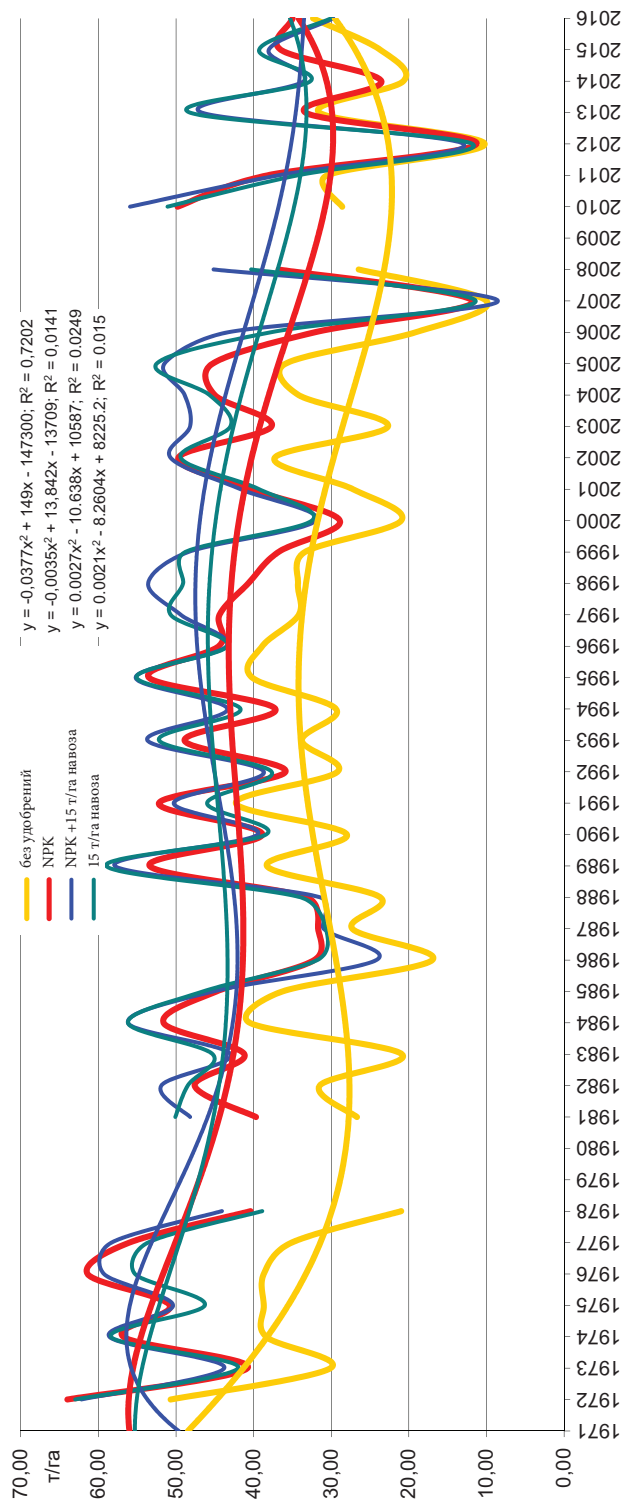


Рисунок 7.2. Урожайность сахарной свеклы при различных системах удобрения в севообороте, 1971-2016, НИИПК Selectia

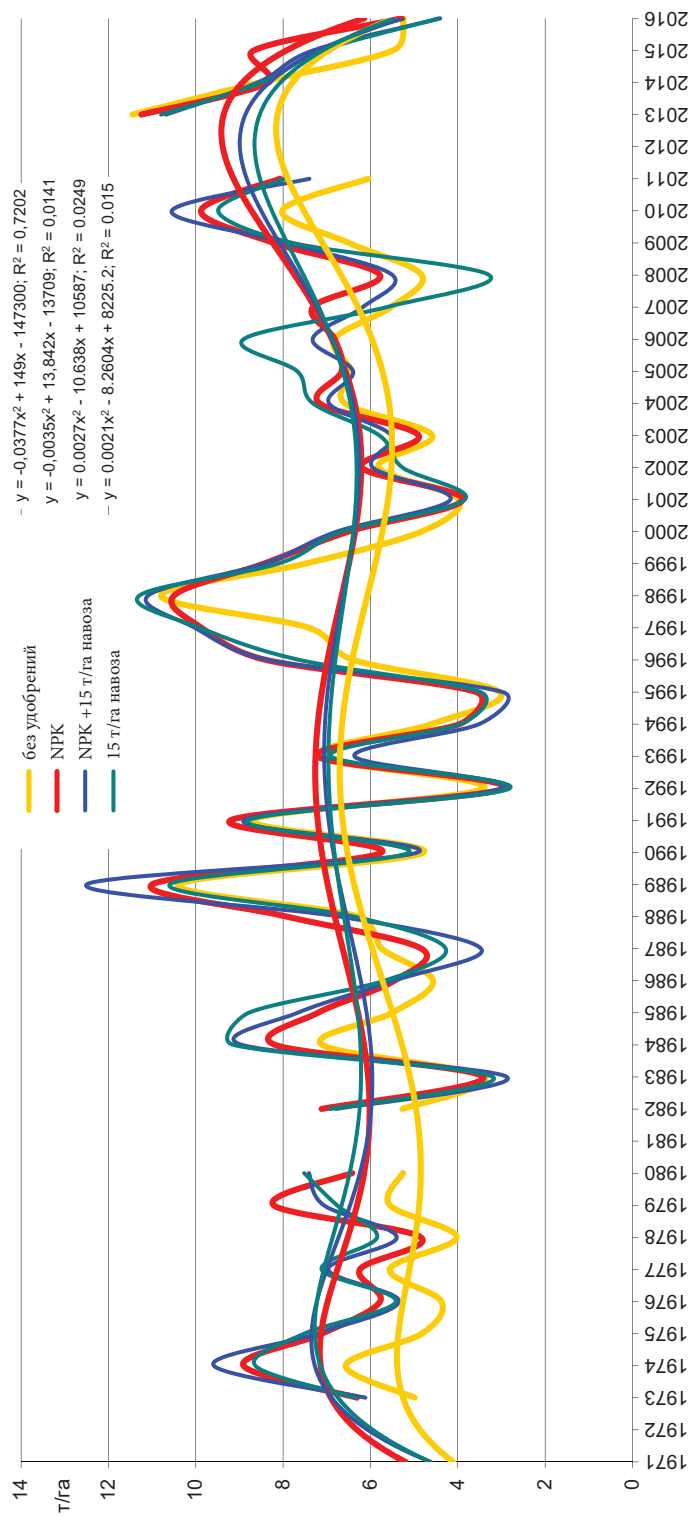


Рисунок 7.3. Урожай кукурузы на зерно при различных системах удобрения в севообороте, 1971–2016, НИИПК *Selechia*.

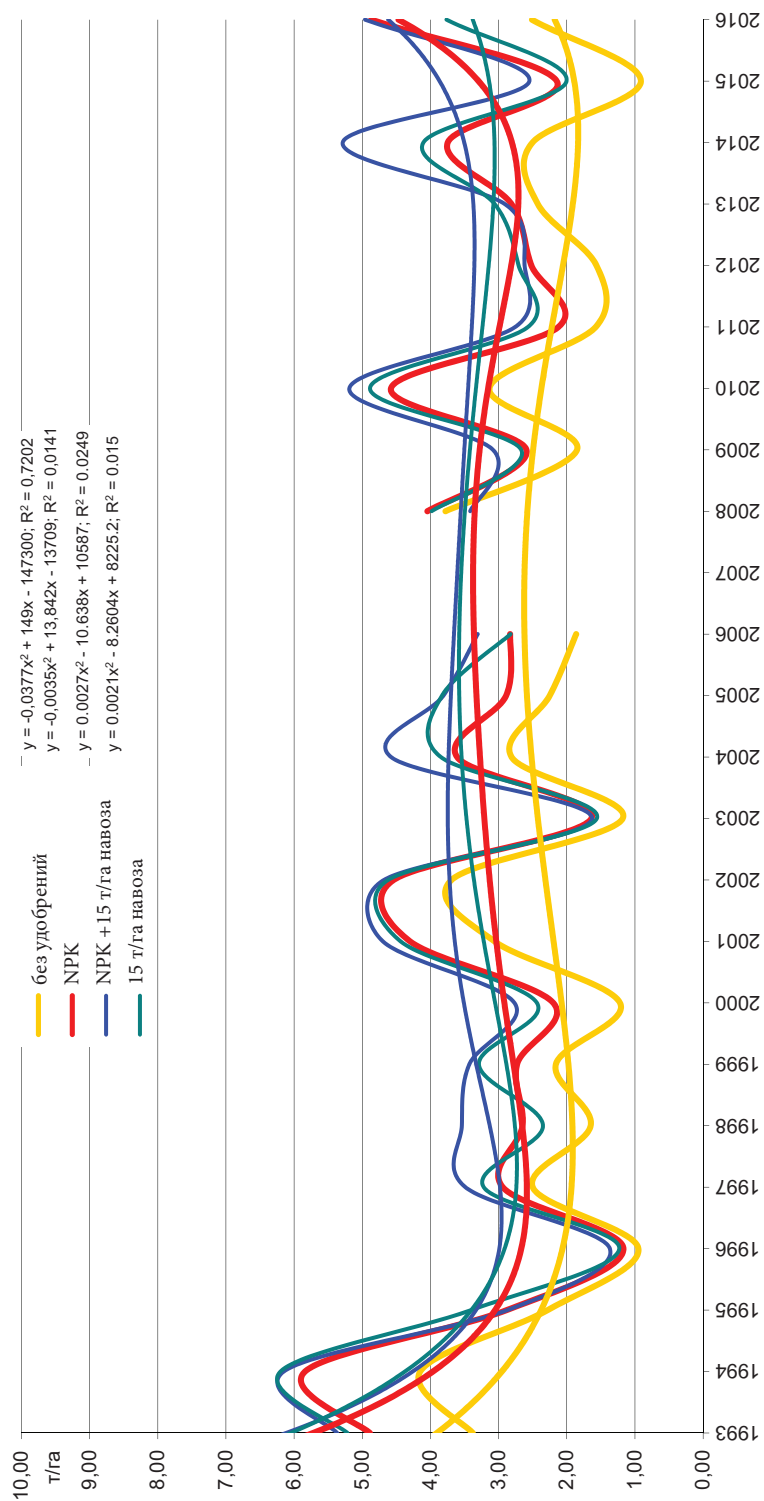


Рисунок 7.4. Урожайность ярового ячменя при разных системах удобрения в севообороте, 1993-2016, НИИПК Selectia

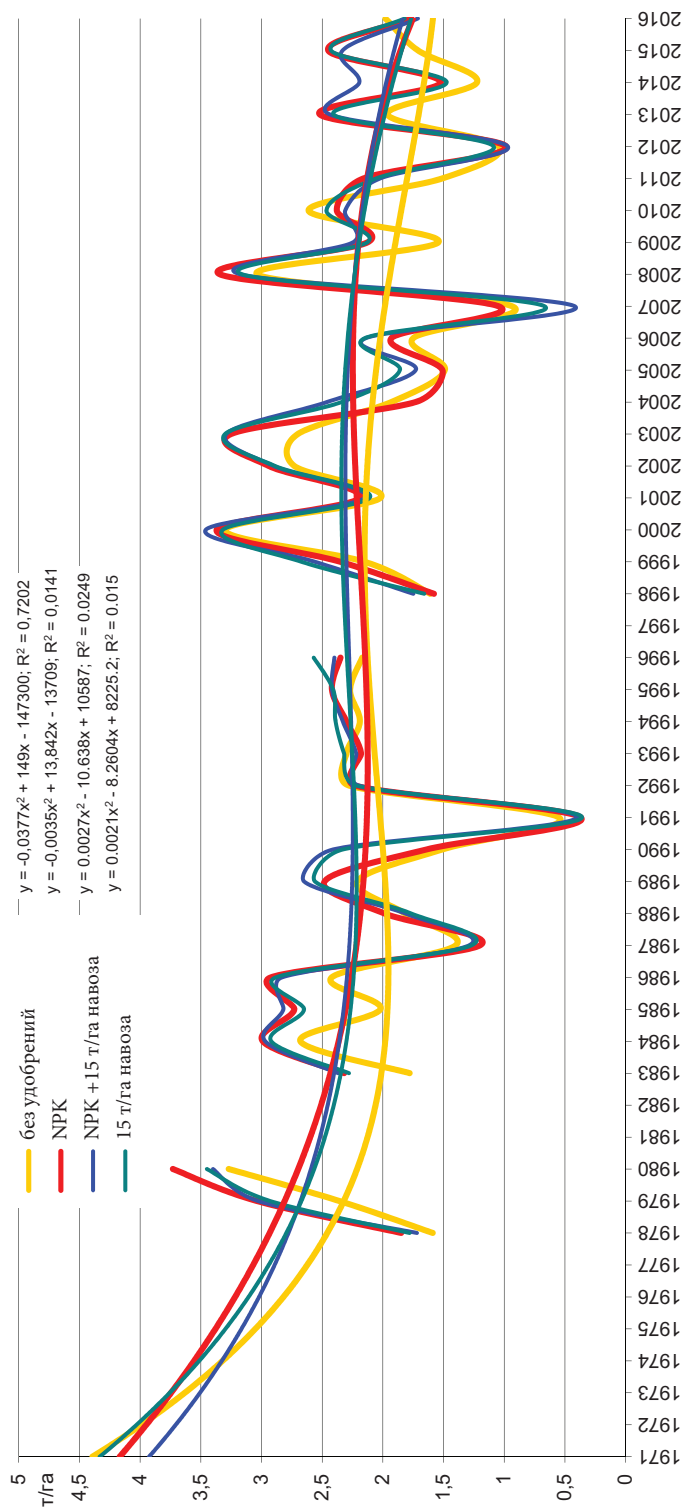


Рисунок 7.5. Урожайность подсолнечника при разных системах удобрения в севообороте, 1971-2016, НИИПК *Seleçtia*

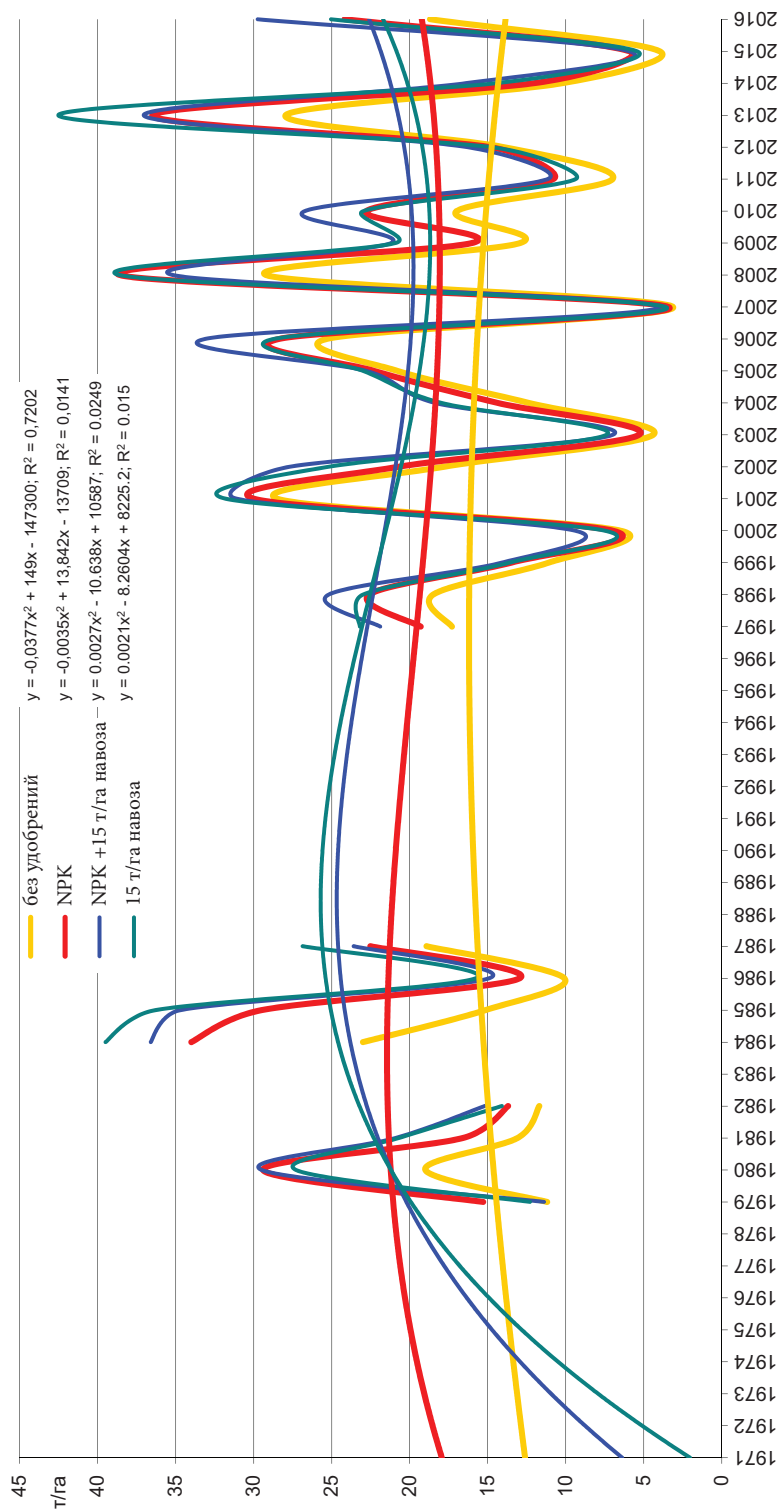


Рисунок 7.6. Урожай смеси вики с овсом на зеленую массу при различных системах удобрения в севообороте, 1971-2016, НИИПСК Selectia

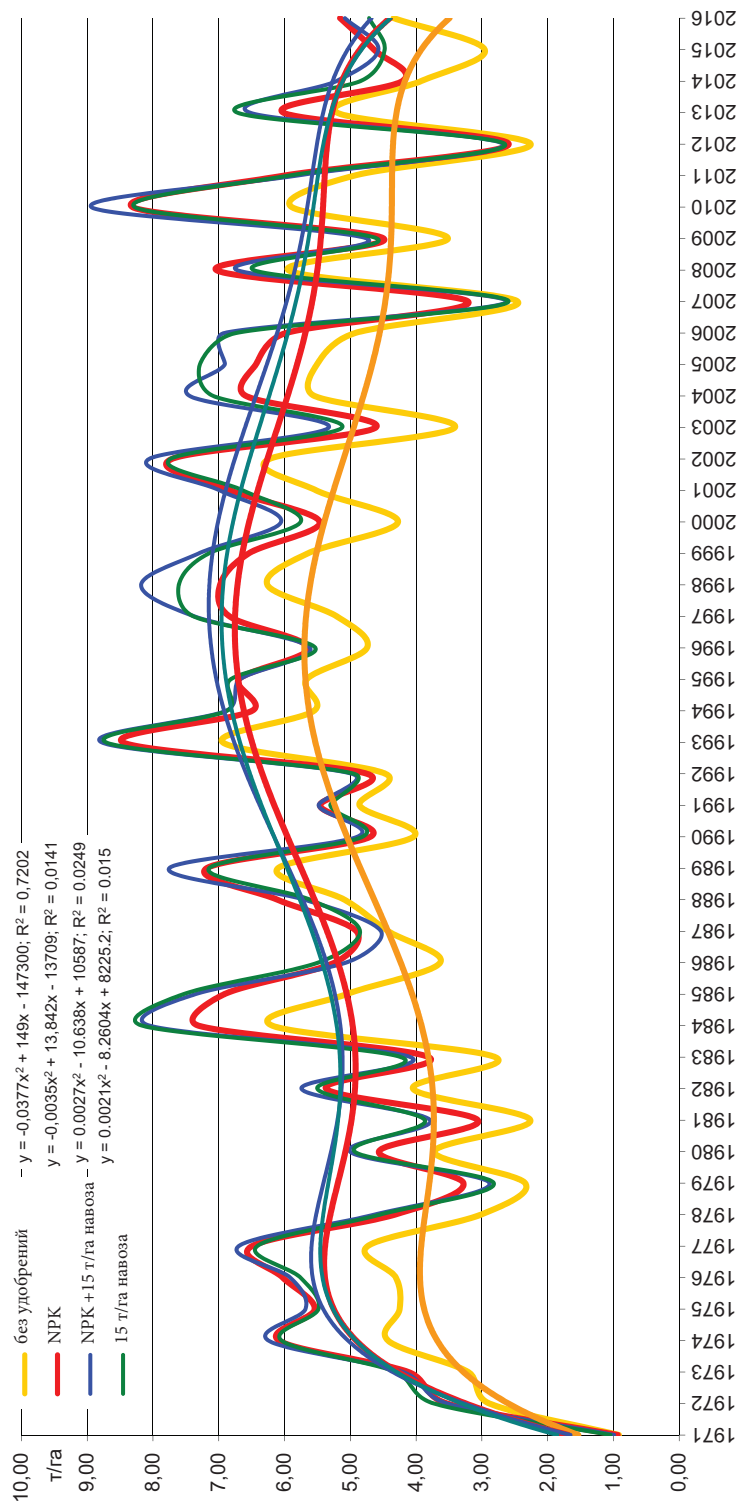


Рисунок 7.7. Продуктивность севооборота (в тоннах зерновых единиц/га) при различных системах удобрения, 1971-2016 гг.

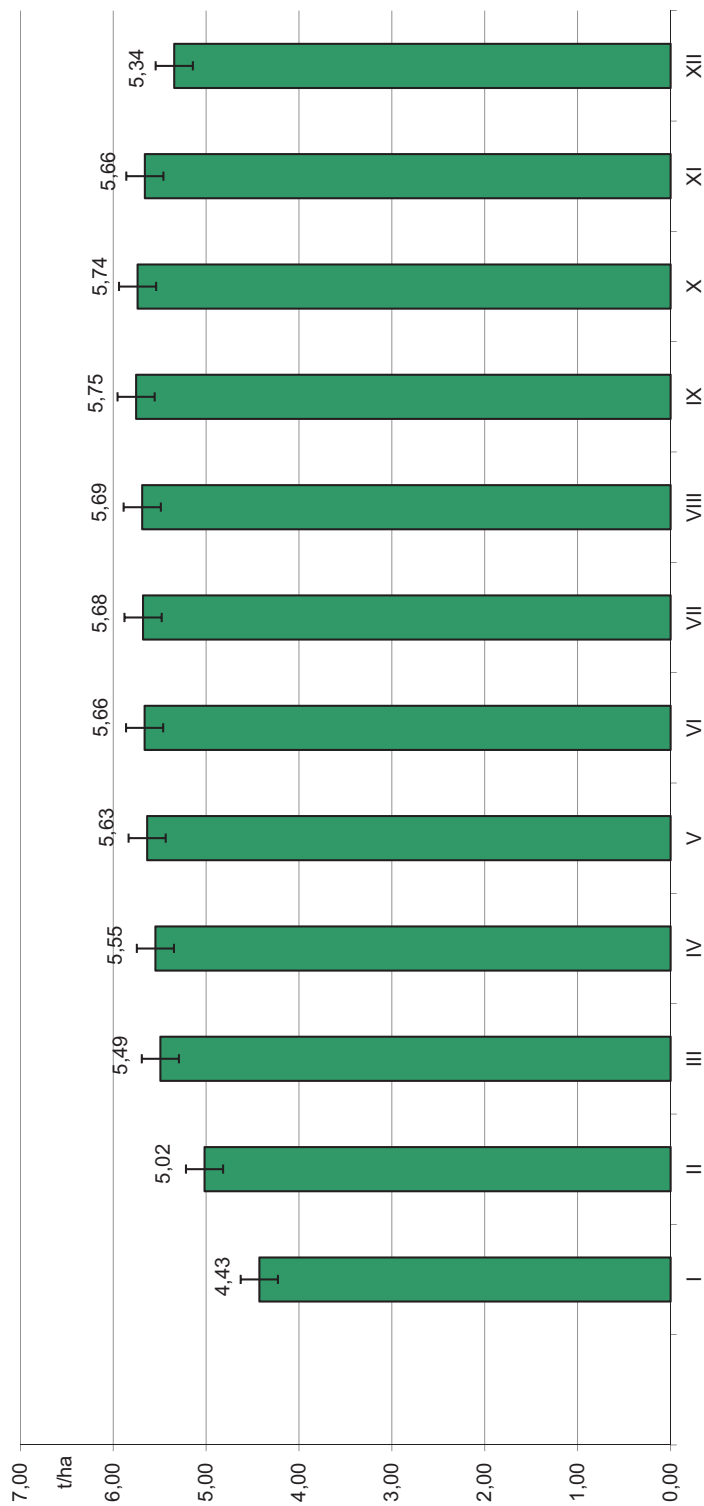


Рисунок 7.8. Продуктивность севооборота (в тоннах зерновых единиц /га) при различных системах удобрения, среднее за 1971-2016 гг.

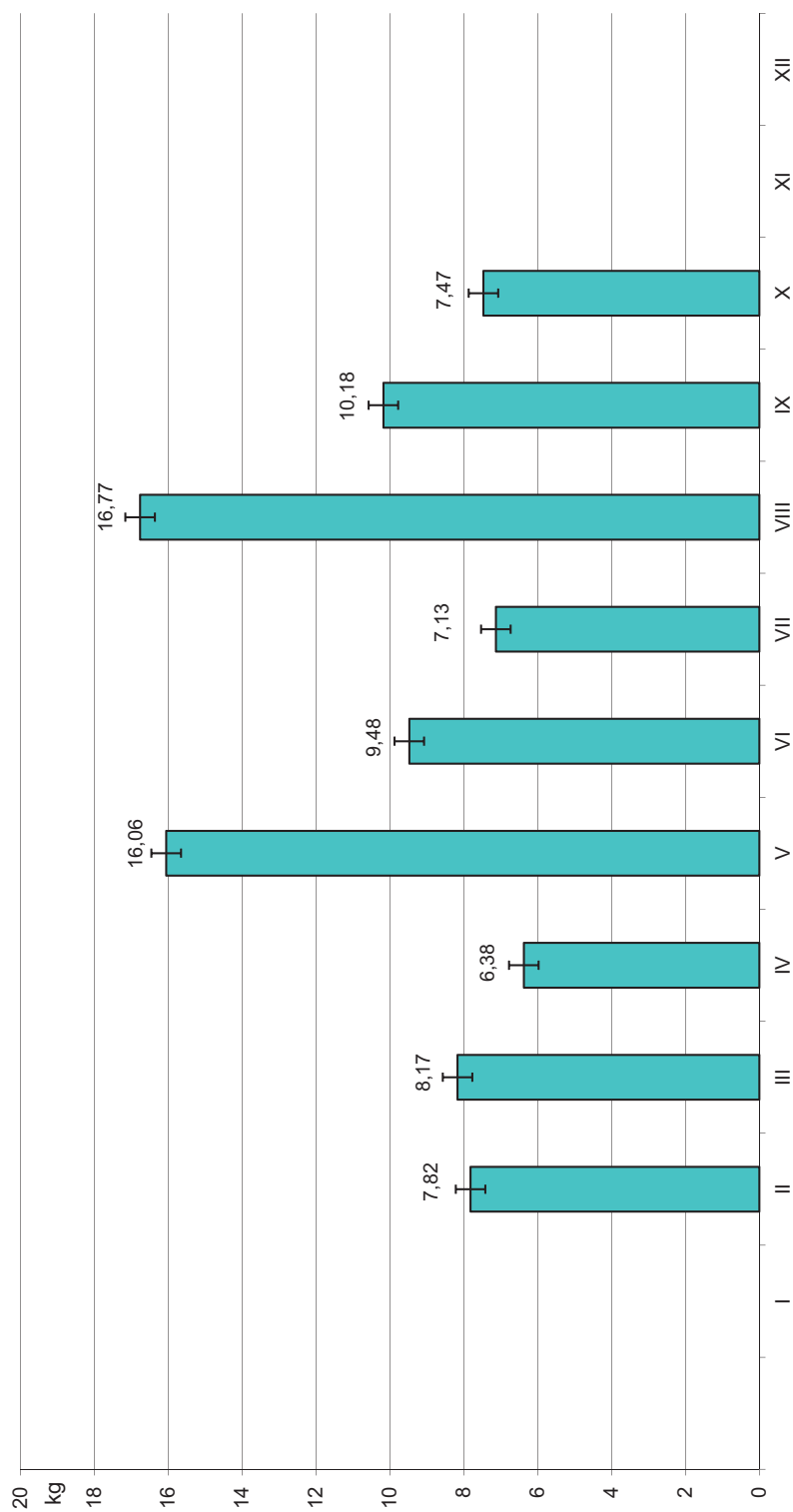


Рисунок 7.9. Окупаемость минеральных удобрений прибавкой урожая сельскохозяйственных культур в севообороте (кг зерновых единиц/1 кг действующего вещества NPK), среднее за 1971-2016 гг.

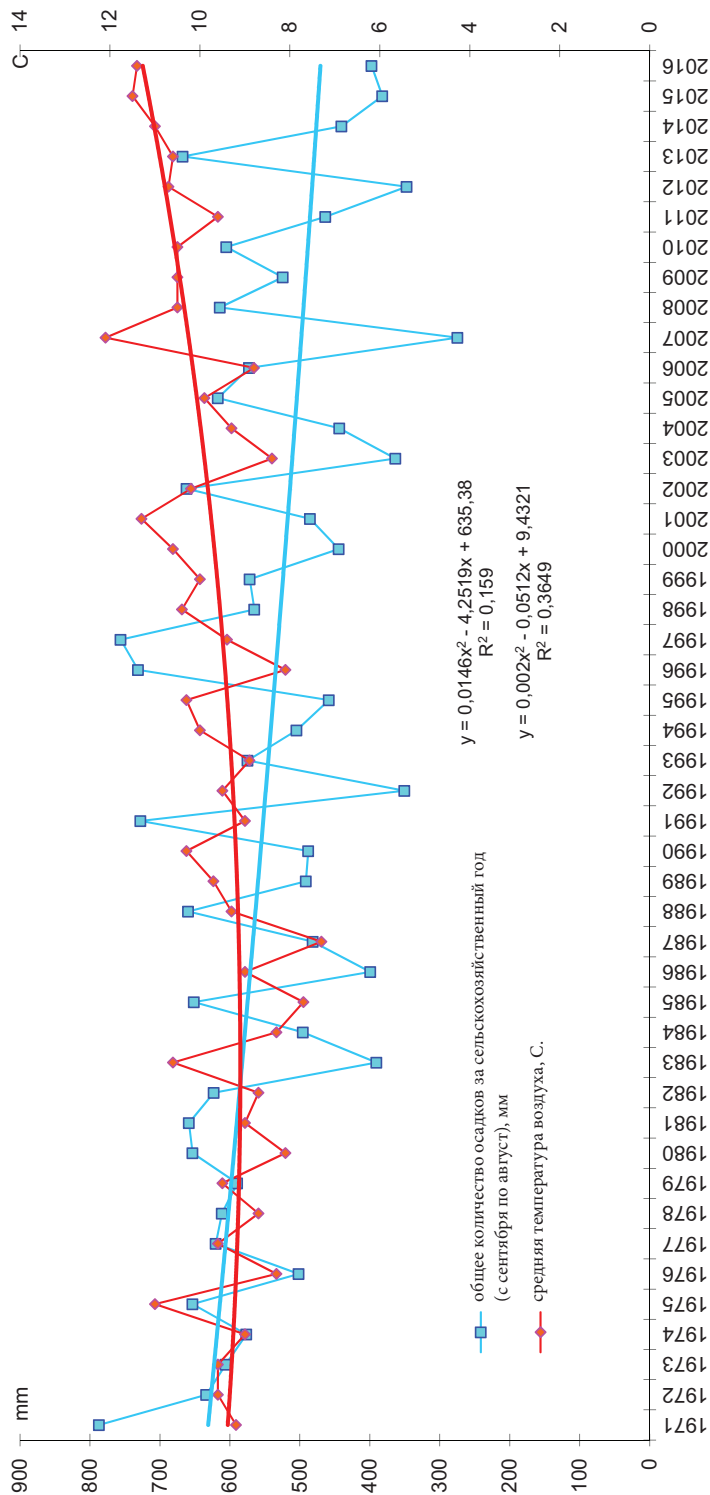


Рисунок 7.10. Динамика осадков и температуры воздуха по данным метеорологической станции НИИПК *Selectia*.

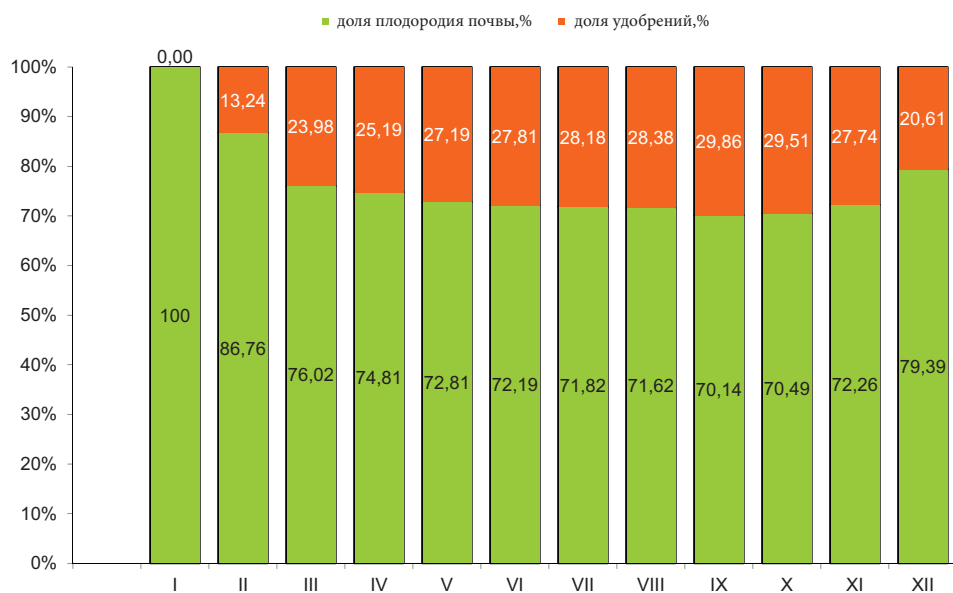


Рисунок 7.11. Доля плодородия почвы и удобрений в формировании урожайности растений в севообороте, среднее за 1971-2016 гг.

Борис БОИНЧАН ▪ Давид ДЕНТ

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ НА ЧЕРНОЗЕМАХ

АДАПТИВНЫЙ
МЕНЕДЖМЕНТ ПОЧВ



Netherlands Enterprise Agency



Книга опубликована в рамках проекта «Органическое интенсивное земледелие: совместные усилия по созданию благоприятной среды для экологических фермеров в Республике Молдова», финансируемого Агентством Министерства экономики и экологической политики – Нидерланды, и реализуемого организацией People in Need Moldova в партнерстве с Prograin Organic.

ISBN 978-9975-54-486-3



9 789975 544863