

РОЛЬ АГРОХИМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ПЕРЕХОДЕ К МОДЕЛИ УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

С.В. МИТРОФАНОВ¹, Н.В. ОРЛОВА¹, И.Ю. БОГДАНЧИКОВ²,
М.Е. ЧАПЛЫГИН³, А.А. ШЕВЧУК⁴

¹ Высшая школа экономики

² Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева

³ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

⁴ Государственный университет по землеустройству

Статья посвящена изучению роли агрохимического обеспечения в переходе к модели устойчивого земледелия, выявлению перспективных направлений научных исследований в рамках данной концепции. Установлено, что агрохимическое обеспечение играет важнейшую роль в обеспечении глобальной продовольственной безопасности. Применение агрохимикатов и пестицидов существенно влияет на повышение урожайности сельскохозяйственных культур, улучшение качества посевов и защиту растений от вредителей и болезней. Однако интенсификация сельского хозяйства в ряде случаев приводит к увеличению потерь продукции, а также антропогенному загрязнению окружающей среды и продуктов питания, что может привести к заболеваниям у людей включая рак, бесплодие, рождение мертворожденных детей и проблемы с нервной системой. Анализ научных исследований показал, что с целью формирования устойчивого земледелия необходимо уделить повышенное внимание разработке и освоению альтернативных методов ведения сельского хозяйства: методам, основанным на максимальном использовании биологических факторов; технологиям, обеспечивающим бездефицитный баланс гумуса; сортовым технологиям, позволяющим максимально реализовывать генетический потенциал сортов; геопространственным методам и оборудованию для прецизионного внесения средств химизации с целью обеспечения их эффективного использования; применению добавок к удобрениям (биостимуляторов, ингибиторов нитрификации, ингибиторов уреазы), повышающих их эффективность и снижающих негативное воздействие на окружающую среду; инновационным методам удобрения и защиты растений, обеспечивающим сохранение почв, окружающей среды, животных, а также здоровье и безопасность человека.

Ключевые слова: устойчивое земледелие, агрохимическое обеспечение, удобрения, пестициды.

Введение

Сельскохозяйственное производство, и особенно растениеводство, являются незаменимым продовольственным и ресурсно-сырьевым базисом цивилизации.

Рост населения на Земле является одной из наиболее серьезных глобальных проблем нашего времени. Количество людей на планете значительно увеличивается каждый год, что приводит к ухудшению экологической ситуации, нехватке ресурсов и к другим социально-экономическим проблемам. Согласно отчету ФАО население Земли в 2020 г. составляло 7,8 млрд чел., а к 2050 г. данный показатель может достигнуть 9,7 млрд чел. Это означает, что за 30 лет население Земли может увеличиться на 1,9 млрд что эквивалентно населению современной Индии.

Существующая тенденция роста населения Земли требует соответствующего количества продовольствия. Однако уже на сегодняшний день более 690 млн

людей в мире страдают от голода, а 3 млрд чел. испытывают проблемы с доступом к достаточному количеству пищи. Прогноз ООН от 11 июля 2022 г. указывает на увеличение спроса на продовольствие к середине столетия [1] более чем на 50%, а на продукты животного происхождения – почти на 70%. В то же время наблюдается сокращение посевной площади в расчете на одного человека. Кроме того, растениеводческая продукция все чаще используется в различных отраслях промышленности и в биоэнергетике, что обуславливает необходимость повышения объемов ее производства [2].

Одновременно с этим сельское хозяйство должно принять меры для снижения негативного влияния на окружающую среду – такие, как уменьшение деградации почв, ограничение выбросов парниковых газов и прекращение расширения сельскохозяйственных угодий за счет уничтожения лесов. Однако по прогнозам, к 2050 г. площадь сельскохозяйственных угодий может увеличиться на 593 млн га, что превышает площадь Индии. Такое расширение может привести к дополнительным выбросам парниковых газов (11 Гт), которые превысят уровень, необходимый для удержания глобального потепления ниже 2°C.

Возникающие климатические изменения, по мнению экспертов, могут привести к снижению продуктивности сельскохозяйственных угодий на 10–20%. Поэтому необходимы дополнительные усилия и стратегии для устранения этих негативных последствий сельского хозяйства и уменьшения его воздействия на окружающую среду [3]. В связи с этим в настоящее время необходимо решить проблему обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства, которое сможет удовлетворять потребности настоящих и будущих поколений в продуктах питания, при этом сохраняя баланс экологии, социальной справедливости и экономической эффективности.

Цель исследований: изучение роли агрохимического обеспечения в переходе к модели устойчивого земледелия, выявление перспективных направлений научных исследований в рамках данной концепции.

Материал и методы исследований

В исследованиях применялись монографический метод, а также методы анализа, систематизации, сравнения, обобщения. Поиск источников данных осуществлялся в научных электронных библиотеках и поисковых системах eLIBRARY.RU, Science Direct, Scopus, на портале ResearchGate. Также при проведении исследования использовались база данных FAOSTAT Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций и данные International Fertilizer Association.

Результаты и их обсуждение

Сегодня устойчивое сельское хозяйство является одним из ключевых элементов устойчивого развития. Оно предполагает рациональное использование природных ресурсов, сохранение биоразнообразия, защиту почвы и водных ресурсов, использование экологически чистых методов производства, развитие сельского туризма и поддержку малых сельскохозяйственных предприятий. Одним из главных принципов устойчивого сельского хозяйства является принцип экологической целостности, который предполагает сохранение баланса между сельскохозяйственными системами и окружающей средой. Для этого необходимо использование интегрированных методов управления агроэкосистемами, которые позволяют учитывать взаимодействие всех компонентов сельскохозяйственной системы. Еще один принцип устойчивого сельского хозяйства – это принцип социальной справедливости,

который предполагает обеспечение равных возможностей для всего занятого в сельском хозяйстве населения независимо от социального статуса и положения.

Кроме того, устойчивое сельское хозяйство должно быть экономически эффективным и прибыльным. Для этого необходимы использование инновационных технологий, усовершенствование системы управления и маркетинга в сельском хозяйстве. В целом устойчивое сельское хозяйство является важным элементом устойчивого развития, которое позволяет обеспечивать продовольственную безопасность, экономическую стабильность и охрану окружающей среды. Сегодня мировое сообщество признает необходимость перехода к устойчивому сельскому хозяйству и работает над разработкой и внедрением соответствующих стратегий и программ.

Опираясь на данные концепции и принципы, на сегодняшний день активно проводятся исследования в области изучения влияния дестабилизирующих факторов на устойчивость сельского хозяйства. Однако подавляющая часть из них не имеет системного характера либо носит оценочный характер. В имеющейся литературе чаще всего анализируется роль экономических и социальных факторов, что определено большей простотой в их оценке.

Оценка экологической устойчивости является более сложной задачей ввиду отсутствия научно обоснованных и апробированных стратегий развития экологизации сельского хозяйства. На сегодня выдвигаются три варианта: 1) снизить общую экологическую нагрузку от ведения сельского хозяйства независимо от производственных последствий; 2) обеспечить максимальное возможное получение продукции при сохранении объемов применения средств интенсификации (например, удобрений, пестицидов, энергии) и объемов выделяемых газов при сокращении масштабов производства; 3) принять консенсус, заключающийся в том, что неблагоприятные для окружающей среды ресурсы, используемые в сельскохозяйственном производстве, должны компенсироваться за счет агроэкологической деятельности, которая создает экологические общественные блага – так называемую экоэффективность [4].

Внимание заслуживает работа польских ученых А. Nowak, А. Krukowski, М. Rozanska-Woczula [5], в рамках которой проведена оценка уровня устойчивости сельского хозяйства в 28 государствах – членах Европейского союза. Оценки проводились на основе синтетической методики (TOPSIS). Этот метод синтезирует факторы различной природы и присваивает им синтетическую совокупную меру. Анализ позволил составить рейтинг государств – членов ЕС – в соответствии с различным уровнем мер и отнести их к одной из четырех групп, характеризующихся различными уровнями устойчивости в сельском хозяйстве. Дифференцированные значения синтетических показателей показали различия в уровне устойчивости сельского хозяйства между государствами, что обусловлено разным уровнем интенсивности производства и связанного с этим воздействия на окружающую среду.

Большинство исследований, посвященных вопросам изучения факторов, оказывающих влияние на устойчивость сельского хозяйства, обладает региональным компонентом, привязано к отдельным странам или регионам. Например, исследование Z. Ahmed и S. Ambinakudige [6] посвящено вопросам влияния на устойчивость сельского хозяйства юго-западного прибрежного района Бангладеша изменений в землепользовании, а также заболачивания и засоления почв, характерных для данного региона. В исследовании Rahman S. [7] рассматривается потенциал устойчивости сельского хозяйства в Бангладеше путем анализа экономических, экологических и социальных проблем на макроуровне. Экономические вопросы были рассмотрены путем оценки вклада сельскохозяйственного сектора в валовой внутренний продукт, тенденций в урожайности зерновых, занятости рабочей силы в сельском хозяйстве

и индекса внутренних цен на продовольствие, охватывающего 38-летний период (1980–2017 гг.).

Экологические проблемы были изучены путем ретроспективного анализа использования удобрений, пестицидов, орошения, интенсивности посевов и выбросов CO₂ в сельском хозяйстве. Социальный контекст устойчивости сельского хозяйства был проанализирован путем изучения таких атрибутов, как использование пахотных земель для урбанизации и других промышленных целей, недоступность пахотных земель, тенденции увеличения импорта продовольственного зерна и изменчивость производства продуктов питания.

Ученым Института сельскохозяйственной экономики Болгарии Храбрином Башевым проведено комплексное исследование [8], включающее в себя как аналитические исследования (оценку устойчивости АПК Болгарии и эффективности управления в сельском хозяйстве), так и практические рекомендации, содержащие механизмы повышения устойчивости сельского хозяйства страны.

В исследовании ученых S. Bulut и Z. Gökalp [9] установлено, что ключевым фактором, влияющим на устойчивость сельского хозяйства Турции, является эрозия почв. Около 86% турецких почв подвержены эрозии, количество почвы, теряемой в результате эрозии за год в Турции, оценено в 500 млн т. В качестве мер по предотвращению эрозии почв авторы рекомендуют почвозащитные системы обработки почв.

Результаты многочисленных международных исследований в подавляющем большинстве случаев не могут использоваться для трансформации АПК России ввиду существенного отличия систем ведения сельского хозяйства и производства продовольствия, что обусловлено природно-климатическими и почвенными условиями, ярко выраженной сезонностью, более сложной логистикой и другими факторами. Данная позиция подтверждается исследованиями ученого Вагенингенского университета A. Gerritsen [10], а также ученых Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского Г.В. Ольховой и Э.Э. Шамилевой [11], посвященных роли регионального компонента в вопросах устойчивости сельского хозяйства.

Отечественные исследования в области устойчивого развития сельского хозяйства ориентированы прежде всего на экономическую составляющую понятия устойчивости. Однако очевидно, что переход к устойчивой модели сельского хозяйства невозможен без комплексного анализа основных дестабилизирующих факторов отрасли – в частности, вопросов экологии и технологичности отрасли.

Почвы – фундаментальная основа производства продукции растениеводства, обеспечивающая глобальную продовольственную безопасность. В связи с этим устойчивое управление почвами является стратегическим приоритетом для аграрного сектора. Однако во всем мире почвы обладают разным уровнем плодородия. В некоторых регионах мира почвы по своей природе являются неплодородными и практически непригодными для ведения сельского хозяйства; в других регионах низкое плодородие почв стало следствием их деградации. В обоих случаях урожайность культур ограничена дефицитом питательных веществ в почве. Это в полной мере касается и Российской Федерации. Дифференцированность природных условий в различных частях страны приводит к широкому многообразию почв на ее территории, которые сегодня насчитывают 76 видов почв и 25 видов почвенных комплексов.

Одной из основных проблем, связанных с использованием почвы для производства продовольствия и поддержания экосистемных услуг, является необходимость оптимального использования питательных элементов. Однако зачастую степень мобилизации этих веществ в почве не соответствует возрастающей потребности растений в них, особенно при увеличении урожайности. Для обеспечения роста

и развития сельскохозяйственных культур необходимо вернуть в почву необходимые питательные вещества. Поэтому производство продукции растениеводства требует использования удобрений.

Рост урожайности и валового производства продукции растениеводства и животноводства невозможен без интенсификации сельского хозяйства, использования средств химизации. Сохранение устойчивости почв возможно лишь при научно обоснованном применении минеральных и органических удобрений, а также при проведении мероприятий по мелиорации земель, снижению ветровой и водной эрозии, улучшению их водного режима. Это в свою очередь в долгосрочной перспективе позволит не нарушать природные экосистемы и прочие виды землепользования, используемые в настоящее время для обеспечения экосистемных услуг, и избежать репрофилирования данных земель для использования в АПК.

Применение удобрений значительно повышает доступность питательных веществ для растений, тем самым улучшая экосистемные услуги почвы, которые прямо или косвенно обеспечивают около 95% мирового производства продовольствия. Рациональное применение питательных элементов способствует производству большей биомассы растений, увеличивает содержание органического вещества в почве [12].

С другой стороны, в отдельных странах (Китай, Нидерланды, Великобритания, Республика Корея и др.) интенсификация производства, чрезмерное внесение удобрений привели к загрязнению почвы, воздуха и воды, к серьезным нарушениям разнообразия биоценозов (рис. 1). Эти крайне контрастные сценарии дисбаланса питательных веществ способствуют снижению продовольственной безопасности, экологической и экономической устойчивости, социальной справедливости. Они усугубляют глобальное изменение климата, приводят к усилению выбросов парниковых газов.

Наряду с внесением удобрений устойчивость отрасли растениеводства во многом определяется негативным действием болезней и вредителей культур. Без надлежащих мероприятий по защите сельхозкультур потери урожая от вредных организмов составляют порядка 25%, в том числе от вредителей – 8%. В связи с этим в большинстве стран-производителей сельскохозяйственной продукции, например, в Российской Федерации, Германии, Аргентине, Индии и др., наблюдается тенденция увеличения объемов применения средств защиты растений (рис. 2), а в ряде стран (Япония, Нидерланды, Республика Корея, Бразилия и др.) применение пестицидов достигло такого уровня, что несет угрозу окружающей среде и здоровью населения.

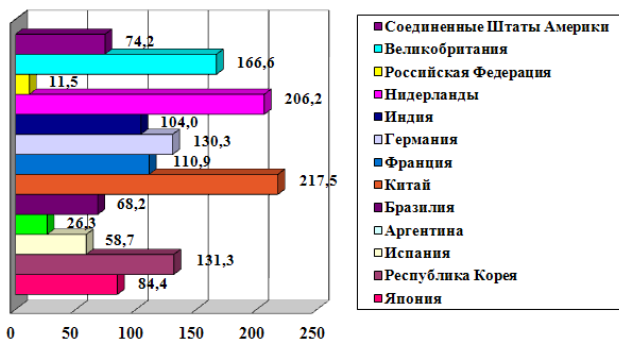


Рис. 1. Внесение азотных удобрений на площадь пахотных земель в основных странах-производителях продукции растениеводства, кг д.в./га*

* Составлено авторами на основе данных FAOSTAT.

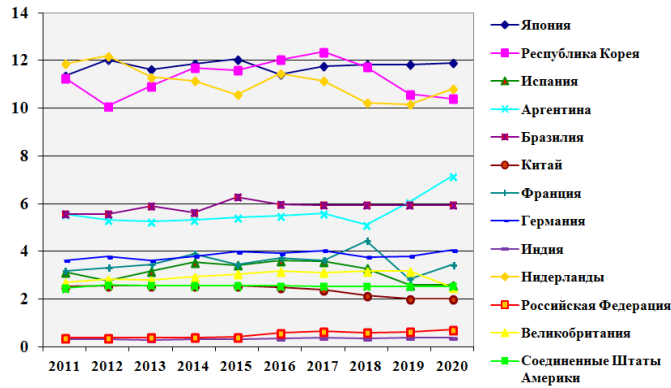


Рис. 2. Использование пестицидов на площадь пахотных земель, кг д.в./га**

Ожидается, что дальнейший интенсивный характер ведения сельского хозяйства приведет к увеличению потерь продукции ввиду создания благоприятных условий для роста и развития сорной растительности, вредных организмов, а также снижения буферного действия биологических факторов борьбы с болезнями.

В Обзоре состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 г., представленном Росгидрометом, приводятся результаты выборочного обследования почв 39 субъектов Российской Федерации. Общая обследованная площадь составляла 29,8 тыс. га, в том числе земли сельскохозяйственного назначения. Установлено, что на территории 5 субъектов Российской Федерации (с учетом ДДТ 10 субъектов) почва не соответствовала установленным гигиеническим нормативам, в частности: далапоном загрязнены 11,5% от обследованной площади 532 га (в 2020 г. – 3,86% от площади 726 га, в 2019 г. – 43,5% от площади 600 га); ПХБ – 3% от обследованной площади 874 га (в 2020 г. – 1,1% от площади 897 га, причем в последний раз загрязненные территории установлены в 2016 г. – 4,6% от площади 578 га).

Расширенное использование средств химизации привело к общемировой проблеме антропогенного загрязнения окружающей среды и продуктов питания. Доля сельскохозяйственного производства в загрязнении окружающей среды весьма ощутима и, по мнению многих исследований, достигает 30%, водоемов и рек – 40%.

Остатки средств химизации включаются в экологические пищевые цепочки, попадая через воду и продукты в организмы животных, птиц, и на конечном этапе – в организм человека, что способствует росту заболеваемости людей. Данные Всемирной организации здравоохранения свидетельствуют о том, что экологические проблемы способствуют повышению риска возникновения у людей более 100 опасных заболеваний. В результате этих заболеваний ежегодно умирают около 12,6 млн чел. [13]. Остатки пестицидов и удобрений могут вызывать различные заболевания – такие, как рак, бесплодие, рождение мертворожденных детей и др. Важно отметить, что дети являются наиболее уязвимой группой населения по отношению к воздействию остатков пестицидов и удобрений. Ряд исследований показал, что дети, проживающие в районах с высоким содержанием пестицидов в почве, имеют более высокий риск развития лейкемии. Кроме того, остатки пестицидов и удобрений могут накапливаться в организме человека и вызывать хронические заболевания. Например, длительное воздействие пестицидов может привести к нарушению работы нервной системы и развитию болезни Паркинсона.

** Составлено авторами на основе данных FAOSTAT.

Интенсивное использование средств химизации в сельскохозяйственных предприятиях Российской Федерации не всегда дает ожидаемый эффект. Так, в СССР в период 1980–1986 гг., несмотря на значительное наращивание количества используемой сельскохозяйственной техники, объемов внесения удобрений, пестицидов и проводимых мелиоративных работ, урожайность основных сельскохозяйственных культур увеличивалась крайне медленно, а по некоторым данным даже снижалась, что, как следствие, привело к необходимости импорта зерна и другой сельскохозяйственной продукции. Это обусловлено тем, что несмотря на сосредоточенность порядка 52% общемировых запасов черноземов, значительная часть территорий находится в зонах с дефицитом тепла либо острой нехватки атмосферных осадков, особенно в теплый период. Природный биоклиматический потенциал страны, особенно гидротермический, в 2,4–3,2 раза ниже, чем в США и странах Западной Европы [14].

Международный и отечественный передовой опыт, накопленный за последние десятилетия, показывает, что развитие отрасли растениеводства и повышения конкурентоспособности получаемой продукции как на внутреннем, так и на международном рынке, обусловлено внедрением в производство инновационных технологий, отвечающих концепции устойчивости, адаптированных к ландшафтно-климатическим условиям и технико-экономическим показателям определенного сельхозпредприятия [15].

Переход к устойчивому земледелию является одним из ключевых факторов в обеспечении продовольственной безопасности России. В Стратегии научно-технологического развития, утвержденной Указом Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642, подчеркивается важность инновационного развития в сельском хозяйстве включая использование устойчивых, экологически чистых и энергоэффективных технологий. Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017–2025 гг., утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 25 августа 2017 г. № 996, также подчеркивает необходимость перехода к устойчивому земледелию и развития биологизированных технологий в сельском хозяйстве. Кроме того, в России действуют программы субсидирования фермеров, внедряющих устойчивые и биологизированные технологии: например, программы по субсидированию затрат на приобретение и установку сельскохозяйственной техники включая технику, работающую на энергии альтернативных источников, – например, солнечной энергии. Также в ряде субъектов РФ сельхозтоваропроизводителям предоставляются субсидии на приобретение семян, удобрений, препаратов и других ресурсов, необходимых для органического земледелия.

Концепция устойчивого земледелия стала весьма важной темой исследований в области агрохимического обеспечения. Научные исследования в этой области направлены на создание новых методов и технологий, которые позволят сельскому хозяйству производить продукцию без нанесения вреда окружающей среде.

Одной из инновационных технологий, используемых в удобрениях почв, является применение удобрений с медленным высвобождением. Удобрения с медленным высвобождением содержат питательные вещества, которые высвобождаются в почву постепенно в течение длительного периода. Это позволяет обеспечить растения необходимыми элементами питания на протяжении всего цикла роста и развития, а также на 30–50% уменьшить количество удобрений, которые необходимо использовать в течение сезона, что позволяет сократить расходы на удобрения и снизить негативное воздействие на окружающую среду [16]. Кроме того, удобрения с медленным высвобождением могут быть более эффективными в улучшении структуры почвы, что может увеличить ее водопроницаемость и уменьшить риск эрозии почвы.

Также активно проводятся исследования в области разработки и применения биологических удобрений, содержащих бактерии, грибы и вирусы. Одним

из наиболее популярных видов биологических удобрений являются микробиологические препараты. Они содержат микроорганизмы, которые положительно влияют на почву и стимулируют рост и развитие растений. Согласно ряду исследований применение микробиологических удобрений повышает урожайность на 15–30% в зависимости от культуры, увеличивает содержание органического вещества в почве на 20–30%. Кроме того, использование биологических удобрений позволяет уменьшить затраты на химические удобрения и пестициды на 30–50% [17–20].

Одним из перспективных направлений исследований является использование биоразлагаемых удобрений. Биоразлагаемые удобрения производятся из растительных и животных отходов, которые разлагаются в почве и улучшают ее структуру. Они представляют собой эффективную альтернативу химическим удобрениям и могут повысить урожайность без нанесения вреда окружающей среде. Биоразлагаемые удобрения содержат множество питательных веществ, которые могут улучшить качество почвы. Также они содержат микроорганизмы, которые могут помочь улучшить структуру почвы и увеличить ее плодородие. Исследования показывают, что использование биоразлагаемых удобрений может увеличить количество органического вещества в почве на 20–30%. Использование биоразлагаемых удобрений может привести к существенному улучшению состояния окружающей среды. Согласно отчету, опубликованному в журнале *Environmental Science & Technology*, использование данных удобрений может снизить выбросы паров аммония на 33%, выбросы оксида азота – на 72%, фосфора – на 78% по сравнению с использованием химических удобрений [21]. Согласно отчету, опубликованному в журнале *Agriculture, Ecosystems & Environment*, использование биоразлагаемых удобрений может снизить затраты на производство на 20–30% по сравнению с использованием химических удобрений [22].

Вызывают также интерес исследования в области использования наноудобрений. Наноудобрения представляют собой частицы, размер которых – меньше 100 нанометров. Они имеют большую поверхностную энергию и более быстро растворимы, что повышает эффективность их использования. Кроме того, они могут иметь специфические свойства – такие, как фотокатализ и магнитные свойства, которые могут быть использованы в сельском хозяйстве. Наночастицы удобрений могут проникать в клетки растений и обеспечивать для них необходимые питательные вещества в нужном количестве.

Исследования показывают, что наноудобрения могут повысить урожайность на 15–30% и снизить потребление удобрений на 20–30% [23]. Примером инновационных наноудобрений могут служить наночастицы серебра, которые можно использовать как антибактериальное средство для предотвращения заболеваний растений. Исследования показали, что использование наноудобрений серебра может снизить заболеваемость растений на 30% [24].

Кроме того, проводятся исследования, нацеленные на решение двух глобальных проблем: утилизацию отходов и поиск альтернативных источников удобрений для почв. В рамках данных исследований изучается использование компостов из растительных и других органических отходов в качестве удобрений. По результатам исследований, проведенных в США, установлено, что использование компоста из органических отходов увеличивает урожайность сельхозкультур на 20% по сравнению с использованием минеральных удобрений [25].

Производство компоста может быть дешевле, чем производство минеральных удобрений, так как он производится из бесплатных материалов. Однако несмотря на все преимущества, использование компоста и других органических удобрений не лишено недостатков. Один из главных недостатков заключается в том, что компосты могут содержать вредные бактерии и вирусы, которые могут нанести вред

растениям и здоровью человека. Но благодаря современным технологиям обработки, можно обеспечить безопасность компоста и других органических удобрений перед их использованием.

Одним из наиболее перспективных направлений в сельском хозяйстве является использование биомодифицированных удобрений. Согласно исследованиям, проведенным в последние годы, биомодифицированные удобрения могут увеличить урожайность на 25–30%, сократить затраты на удобрения до 50% и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Кроме того, они могут улучшить качество почвы и увеличить устойчивость растений к болезням и вредителям [26–28].

Важным направлением исследований в области агрохимического обеспечения сельского хозяйства является также разработка новых методов защиты растений от вредителей и болезней. На сегодня эксперты сходятся во мнении о том, что для защиты сельхозкультур должна применяться система интегрированной защиты растений (Integrated Pest Management, IPM). Этот подход к защите растений комбинирует различные методы защиты растений, чтобы свести к минимуму воздействие вредителей на культуры. IPM использует все возможные методы защиты растений включая биологические, химические, культурные и механические методы, обеспечивая эффективную защиту растений при минимальном использовании химических пестицидов. Целью IPM является поддержание баланса между вредителями и их естественными врагами, а также минимизация ущерба от вредителей на культурах. Для реализации этой цели IPM использует мониторинг вредителей и определение порога вредоносности, то есть минимального уровня наличия вредителей, при котором они могут нанести ущерб культурам. Когда уровень наличия вредителей достигает порога вредоносности, IPM применяет методы контроля вредителей – такие, как биологические агенты, химические пестициды или механические методы, чтобы снизить ущерб от вредителей.

Интегрированная защита растений может быть эффективным способом их защиты и снижения затрат на нее, поскольку комплексно использует различные методы для защиты растений. Кроме того, она может уменьшить риск развития устойчивости вредителей к химическим пестицидам и негативное воздействие на окружающую среду и человеческое здоровье. Согласно исследованиям применение IPM в сельском хозяйстве может снизить затраты на защиту растений на 30–50% и увеличить урожайность на 20–30% [29]. Исследование, опубликованное в журнале Crop Protection в 2018 г., показало, что IPM может быть эффективным способом защиты растений от вредителей и болезней в хлопковых культурах [30].

Одним из ключевых элементов IPM является использование биологических препаратов. Они могут быть произведены из различных источников включая бактерии, грибы, вирусы и насекомые хищники. Наиболее часто для производства биопестицидов используются бактерии *Bacillus thuringiensis*, гриб *Trichoderma*, вирус *Baculovirus*.

К наиболее интересным видам защиты растений относится использование эндофитных бактерий. Они живут внутри растений и помогают им бороться с вредителями и болезнями. Исследования показывают, что использование эндофитных бактерий может уменьшить потребность в пестицидах на 50–90% в зависимости от культуры [31].

Проводятся также исследования по применению в качестве средств защиты растений растительных экстрактов. Некоторые исследования показывают, что использование растительных экстрактов и биологических препаратов на их основе может быть эффективной альтернативой химическим пестицидам. Например, исследование, проведенное в Китае, показало, что использование растительных экстрактов может снизить затраты на пестициды на 30–50% [32].

Выводы

Таким образом, с целью формирования устойчивого земледелия необходимо уделить повышенное внимание разработке и освоению альтернативных методов ведения сельского хозяйства: методам, основанным на максимальном использовании биологических факторов; технологиям, обеспечивающим бездефицитный баланс гумуса; сортовым технологиям, позволяющим максимально реализовывать генетический потенциал сортов; геопространственным методам и оборудованию для прецизионного внесения средств химизации с целью обеспечения их эффективного использования; применению добавок к удобрениям (биостимуляторов, ингибиторов нитрификации, ингибиторов уреазы), повышающих их эффективность и снижающих негативное воздействие на окружающую среду; инновационным методам удобрения и защиты растений, обеспечивающим сохранение почв, окружающей среды, животных, а также здоровье и безопасность человека.

Библиографический список

1. Население планеты скоро вырастет до 8 миллиардов – и что тогда? – URL: <https://www.un.org/ru/184344>.
2. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. – 2020. – № 6. – С. 3–13. DOI: 10.31857/S0002188120060125.
3. Ranganathan J., Waite R., Searchinger T., Hanson C. How to Sustainably Feed 10 Billion People by 2050. – URL: <https://www.wri.org/insights/how-sustainably-feed-10-billion-people-2050-21-charts>.
4. Czyżewski B., Matuszczak A., Muntean A. Approaching environmental sustainability of agriculture: environmental burden, eco-efficiency or eco-effectiveness // Agricultural Economics. – 2019. – № 7. – Pp. 299–306. – URL: <https://doi.org/10.17221/290/2018-AGRICECON>.
5. Nowak A., Krukowski A., Rozanska-Boczula M. Assessment of Sustainability in Agriculture of the European Union Countries // Agronomy. – 2019. – № 9. DOI: 10.3390/agronomy9120890.
6. Ahmed Z., Ambinakudige S. Does land use change, waterlogging, and salinity impact on sustainability of agriculture and food security? Evidence from southwestern coastal region of Bangladesh // Environ Monit Assess. – 2023. – № 195. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10673-w>.
7. Rahman S. Bangladesh Agricultural Sustainability: Economic, Environmental and Social Issues // In book: Bangladesh: Economic, Political and Social Issues. Publisher: Nova Science Publishers, 2018. – Pp. 1–25.
8. Bashev H. Agricultural Economics, Governance and Innovation in Bulgaria. – Vol. 2. – KSP Books. – URL: https://www.researchgate.net/publication/356740174_Agricultural_Economics_Governance_and_Innovation_in_Bulgaria_Vol2.
9. Bulut S., Gökalp Z. Agriculture and environment interaction // Current Trends in Natural Sciences. – 2022. – № 11(21). – Pp. 372–380. – URL: <https://doi.org/10.47068/ctns.2022.v11i21.041>.
10. Gerritsen A. Territorial knowledge governance Pursuing sustainability in agriculture and food clusters // PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands. – 2019. – 196 p. – URL: <https://doi.org/10.18174/499274>.
11. Ольховая Г.В., Шамилева Э.Э. Устойчивость сельского хозяйства как социо-эколого-экономической системы: региональный аспект // Экономика строительства и природопользования. – 2021. – № 3 (80). – С. 64–77. DOI: 10.37279/2519-4453-2021-3-64-77.

12. ФАО, 2019. Международный кодекс поведения в области устойчивого использования удобрений и управления ими. Рим. – URL: <https://www.fao.org/3/ca-5253ru/CA5253RU.pdf>.

13. Джувеликян Х.А., Черепухина И.В. Современные проблемы природного и техногенного загрязнения окружающей среды: Обзор // Живые и биокосные системы. – 2017. – № 22. – URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-22/article-8>.

14. Гордеев А.В. и др. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. – М.: Т-во научных изданий КМК, 2006. – 512 с.

15. Папаскири Т.В. Экономическое обоснование проектов землеустройства в системе адаптивно-ландшафтного земледелия на основе автоматизации // Актуальные проблемы природообустройства, кадастра и землепользования: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. – 2016. – С. 210–216.

16. Gupta S.K., Gupta P., Yadav A.D., Gangwar N. Slow-Release Fertilizer: A Review // Journal of Agricultural Science and Technology. – 2019. – Vol. 3, № 8. – Pp. 647–658.

17. Liu T. et al. The use of biological fertilizers in improving crop yield and quality // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2019. – № 284. – P. 106585. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106585.

18. Кузьмина Л.Ю., Румянцева Н.А. Микробиологические удобрения и их влияние на урожайность // Вестник ВГУ. Серия «Биология, экология». – 2019. – № 1. – С. 45–50. DOI: 10.20914/2310-1202-2019-1-45-50.

19. Liu Y. et al. The role of endophytic bacteria in improving soil quality and crop productivity // European Journal of Soil Biology. – 2018. – № 84. – Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2017.11.005.

20. Каменских М.В., Ягодкин А.В. Сравнительный анализ использования биологических и химических удобрений в сельском хозяйстве // Вестник научных конференций. – 2018. – № 2 (22). – С. 77–81.

21. Khan S., Mulvaney R., Hicks L., Niboyet A. A simpler method for estimating the contribution of nitrogen from the atmosphere to agricultural soils // Environmental Science & Technology. – 2010. – 44 (21). – Pp. 8191–8195. DOI: 10.1021/es1023255.

22. Zhang X. et al. The use of biodegradable fertilizers to improve crop yield and quality // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2020. – № 293. – P. 106862. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106862.

23. Wang P., Lombi E. Nanotechnology for sustainable agriculture: Recent advances and future prospects // Environmental Science: Nano. – 2019. – № 6 (6). – Pp. 1735–1751. DOI: 10.1039/C9EN00343C.

24. Gogos A., Knauer K., Bucheli T.D., Dobrowolski R. Nanomaterials in plant protection and fertilization: Current state, foreseen applications, and research priorities // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2012. – № 60 (39). – Pp. 9781–9792. DOI: 10.1021/jf300964w.

25. Kumar A. et al. Composting of organic waste: A review // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – № 24 (19). – Pp. 15235–15255. DOI: 10.1007/s11356-017-9026-9.

26. Митрофанов С.В., Орлова Н.В. Использование биомодификации удобрений с целью повышения устойчивости растениеводства // Агрохимический вестник. – 2023. – № 1. – С. 23–30. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-1-004.

27. Pandey R.K., Singh S.K., Kumar R., Kumar A. Biologically modified fertilizers: a review of innovative methods and technologies // Agriculture and Agricultural Science Procedia. – 2017. – № 11. – Pp. 438–445. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.07.043.

28. Kumar A., Pandey R.K., Singh S.K. Biological Nitrogen Fixation for Sustainable Agriculture: A Perspective // Journal of Pure and Applied Microbiology. – 2015. – № 9 (1). – Pp. 377–386. DOI: 10.22207/JPAM.9.SPL1.47.

29. Hassanal A. et al. Integrated pest management: the push-pull approach for controlling insect pests of cereals, and its potential for other agricultural systems including animal husbandry // Philosophical Transactions of the Royal Society. – 2008. – № 363. – Pp. 611–621. DOI: 10.1098/rstb.2007.2173.

30. Lu Y. et al. Effects of integrated pest management (IPM) on cotton pests and their natural enemies in China // Crop Protection. – 2018. – № 112. – Pp. 11–18.

31. Köberl Martina et al. Exploring the plant-associated microbiome in oilseed rape – associations between bacterial communities, nutrient availability and plant health // Frontiers in plant science. – 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.01189.

32. Yang Bi-Jun et al. Plant extracts reduce pesticide use and increase crop yield in China // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2019. – № 116 (44). – Pp. 22068–22073. DOI: 10.1073/pnas.1909865116.

IMPORTANCE OF AGROCHEMICAL SUPPORT IN THE TRANSITION TO A SUSTAINABLE FARMING MODEL

S.V. MITROFANOV¹, N.V. ORLOVA¹, I.YU. BOGDANCHIKOV²,
M.E. CHAPLYGIN³, A.A. SHEVCHUK⁴

(¹Higher School of Economics,

²Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev,

³Federal Scientific Agroengineering Center VIM,

⁴State University of Land Use Planning)

This work is devoted to studying the role of agrochemical support in the transition to a sustainable farming model, identifying promising areas of research within the framework of this concept. It has been established that agrochemical support plays a crucial role in ensuring global food security. The use of agrochemicals and pesticides has a significant effect on increasing crop yields, improving crop quality and protecting plants from pests and diseases. However, the intensification of agriculture in some cases leads to increased production losses, as well as anthropogenic pollution of the environment and food, which can lead to human diseases, including cancer, infertility, stillbirth, and nervous system problems. The use of agrochemicals and pesticides has a significant impact on increasing crop yields, improving crop quality and protecting crops from pests and diseases. However, agricultural intensification in some cases leads to increased production losses, as well as anthropogenic pollution of the environment and food, which can lead to human diseases, including cancer, infertility, stillbirths and nervous system problems. The analysis of scientific research has shown that in order to create a sustainable agriculture, it is necessary to pay more attention to the development and adoption of alternative farming methods: methods based on the maximum use of biological factors; technologies that ensure a deficit-free humus balance; varietal technologies that allow for the maximum realisation of the genetic potential of varieties; geospatial methods and equipment for the precision application of chemicals to ensure their effectiveness; the use of fertiliser additives (biostimulants, nitrification inhibitors, urease inhibitors) that increase their efficiency and reduce their negative impact on the environment; innovative methods of fertilisation and plant protection that ensure the preservation of soils, environment, animals, as well as the human health and safety.

Key words: sustainable agriculture, agrochemical supply, fertilizers, pesticides.

References

1. The Global Population Will Soon Reach Eight Billion – What Then? URL: <https://www.un.org/ru/184344> (In Rus.)
2. *Sychev V.G., Shafran S.A., Vinogradova S.B.* Soil Fertility in Russia and Ways of Its Regulation. *Agrokhimia*. 2020; 6: 3–13. DOI: 10.31857/S0002188120060125 (In Rus.)
3. *Ranganathan J., Waite R., Searchinger T., Hanson C.* How to Sustainably Feed Ten Billion People by 2050. URL: <https://www.wri.org/insights/how-sustainably-feed-10-billion-people-2050-21-charts>
4. *Czyżewski B., Matuszczak A., Muntean A.* Approaching environmental sustainability of agriculture: environmental burden, eco-efficiency or eco-effectiveness. *Agricultural Economics*. 2019; 7: 299–306. URL: <https://doi.org/10.17221/290/2018-AGRICECON>
5. *Nowak A., Krukowski A., Rozanska-Boczula M.* Assessment of Sustainability in Agriculture of the European Union Countries. *Agronomy*. 2019; 9. DOI: 10.3390/agronomy9120890
6. *Ahmed Z., Ambinakudige S.* Does land use change, waterlogging, and salinity impact on sustainability of agriculture and food security? Evidence from southwestern coastal region of Bangladesh. *Environ Monit Assess*. 2023; 195. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10673-w>
7. *Rahman S.* Bangladesh Agricultural Sustainability: Economic, Environmental and Social Issues. Bangladesh: Economic, Political and Social Issues. Nova Science Publishers, 2018: 1–25.
8. *Bashev H.* Agricultural Economics, Governance and Innovation in Bulgaria. Vol. 2. KSP Books. URL: https://www.researchgate.net/publication/356740174_Agricultural_Economics_Governance_and_Innovation_in_Bulgaria_Vol2
9. *Bulut S., Gökalp Z.* Agriculture and environment interaction. *Current Trends in Natural Sciences*. 2022; 11(21): 372–380. URL: <https://doi.org/10.47068/ctns.2022.v11i21.041>
10. *Gerritsen A.* Territorial knowledge governance Pursuing sustainability in agriculture and food clusters. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2019: 196. URL: <https://doi.org/10.18174/499274>
11. *Ol'khovaya G.V., Shamileva E.E.* Sustainability of Agriculture as a Socio-Ecological and Economic System: The Regional Aspect. *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*. 2021; 3 (80): 64–77. DOI: 10.37279/2519-4453-2021-3-64-77 (In Rus.)
12. FAO, 2019. International Code of Conduct for the Sustainable Use and Management of Fertilizers. Rome. URL: <https://www.fao.org/3/ca5253ru/CA5253RU.pdf> (In Rus.)
13. *Dzhuvelikyan Kh.A., Cherepukhina I.V.* Modern Problems of Natural and Man-Made Environmental Pollution (Review). *Zhivye i biokosnye sistemy*. 2017; 22. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-22/article-8> (In Rus.)
14. *Gordeev A.V. et al.* Bioclimatic Potential of Russia: Theory and Practice. M.: T-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2006: 512. (In Rus.)
15. *Papaskiri T.V.* Economic Justification of Land Management Projects in the System of Adaptive Landscape Farming Based on Automation. Aktual'nye problemy prirodobustroystva, kadastra i zemlepol'zovaniya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu fakul'teta zemleustroystva i kadastrv VGau. 2016: 210–216. EDN: XQUFWX (In Rus.)
16. *Gupta S.K., Gupta P., Yadav A.D., Gangwar N.* Slow-Release Fertilizer: A Review. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2019; 3; 8: 647–658.
17. *Liu T. et al.* The use of biological fertilizers in improving crop yield and quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2019; 284; 106585. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106585

18. *Kuzmina L.Yu., Rumyantseva N.A.* Microbiological Fertilizers and Their Effect on Yield. *Vestnik VGU. Seriya: Biologiya, ekologiya.* 2019; 1: 45–50. DOI: 10.20914/2310-1202-2019-1-45-50 (In Rus.)
19. *Liu Y. et al.* The role of endophytic bacteria in improving soil quality and crop productivity. *European Journal of Soil Biology.* 2018; 84: 1–13. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2017.11.005
20. *Kamenskikh M.V., Yagodkin A.V.* Comparative Analysis of the Use of Biological and Chemical Fertilizers in Agriculture. *Vestnik nauchnykh konferentsiy.* 2018; 2(22): 77–81. (In Rus.)
21. *Khan S., Mulvaney R., Hicks L., Niboyet A.* A simpler method for estimating the contribution of nitrogen from the atmosphere to agricultural soils. *Environmental Science & Technology.* 2010; 44(21): 8191–8195. DOI: 10.1021/es1023255
22. *Zhang X. et al.* The use of biodegradable fertilizers to improve crop yield and quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2020; 293; 106862. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106862
23. *Wang P., Lombi E.* Nanotechnology for sustainable agriculture: Recent advances and future prospects. *Environmental Science: Nano.* 2019; № 6(6): 1735–1751. DOI: 10.1039/C9EN00343C
24. *Gogos A., Knauer K., Bucheli T.D., Dobrowolski R.* Nanomaterials in plant protection and fertilization: Current state, foreseen applications, and research priorities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 2012; 60(39): 9781–9792. DOI: 10.1021/jf300964w
25. *Kumar A. et al.* Composting of organic waste: A review. *Environmental Science and Pollution Research.* 2017; 24(19): 15235–15255. DOI: 10.1007/s11356-017-9026-9
26. *Mitrofanov S.V., Orlova N.V.* Use of Biomodification of Fertilizers in order to Increase Sustainability of Crop Production. *Agrokhimicheskiy vestnik.* 2023; 1: 23–30. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-1-004 (In Rus.)
27. *Pandey R.K., Singh S.K., Kumar R., Kumar A.* Biologically modified fertilizers: a review of innovative methods and technologies. *Agriculture and Agricultural Science Procedia.* 2017; 11: 438–445. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.07.043
28. *Kumar A., Pandey R.K., Singh S.K.* Biological Nitrogen Fixation for Sustainable Agriculture: A Perspective. *Journal of Pure and Applied Microbiology.* 2015; 9 (1): 377–386. DOI: 10.22207/JPAM.9.SPL1.47
29. *Hassanali A. et al.* Integrated pest management: the push-pull approach for controlling insect pests of cereals, and its potential for other agricultural systems including animal husbandry. *Philosophical Transactions of the Royal Society.* 2008; 363: 611–621. DOI: 10.1098/rstb.2007.2173
30. *Lu Y. et al.* Effects of integrated pest management (IPM) on cotton pests and their natural enemies in China. *Crop Protection.* 2018; 112: 11–18.
31. *Köberl, Martina, et al.* Exploring the plant-associated microbiome in oilseed rape—associations between bacterial communities, nutrient availability, and plant health. *Frontiers in plant science.* 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.01189
32. *Yang Bi-Jun et al.* Plant extracts reduce pesticide use and increase crop yield in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2019; 116(44): 22068–22073. DOI: 10.1073/pnas.1909865116

Митрофанов Сергей Владимирович, канд. с.-х. наук, научный сотрудник Института аграрных исследований Высшей школы экономики; 109028, Российская Федерация, г. Москва, Покровский бульвар, 11; e-mail: f-mitrofanoff2015@yandex.ru; тел.: (958) 657-47-01

Орлова Надежда Владимировна, заведующий отделом экономики инноваций в сельском хозяйстве Института аграрных исследований Высшей школы экономики; 109028, Российская Федерация, г. Москва, Покровский бульвар, 11; e-mail: nvorlova@hse.ru; тел.: (903) 147–99–29

Богданчиков Илья Юрьевич, канд. техн. наук, доцент Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева; 390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, 1; e-mail: smus62@yandex.ru; тел.: (910) 645–12–24

Чаплыгин Михаил Евгеньевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский пр-д, 5, стр. 1; e-mail: misha2728@yandex.ru; тел.: (918) 989–21–84

Шевчук Артем Александрович, старший преподаватель кафедры геодезии и геоинформатики Государственного университета по землеустройству; 105064, Российская Федерация, г. Москва, ул. Казакова, 15; e-mail: shevchukaa@guz.ru; тел.: (916) 856–19–96

Sergey V. Mitrofanov, CSc (Ag), Research Associate, the Institute of Agrarian Research of the Higher School of Economics (11, Pokrovskiy Ave., Moscow, 109028, Russian Federation; phone: (958) 657–47–01; E-mail: mitrofanoff2015@yandex.ru)

Nadezhda V. Orlova, Head of the Department of Innovation Economy in Agriculture, the Institute of Agrarian Research of the Higher School of Economics (11, Pokrovskiy Ave., Moscow, 109028, Russian Federation; phone: (903) 147–99–29; E-mail: nvorlova@hse.ru)

Илья Ю. Богданчиков, CSc (Eng), Associate Professor of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (1, Kostycheva Str., Ryazan, 390044, Russian Federation; phone: (910) 645–12–24; E-mail: smus62@yandex.ru)

Mikhail E. Chaplygin, CSc (Eng), Senior Research Associate, the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, b.1, 1-iy Institutskiy Passage, Moscow, 109428, Russian Federation; phone: (918) 989–21–84; E-mail: misha2728@yandex.ru)

Artem A. Shevchuk, Senior Lecturer, Department of Geodesy and Geoinformatics, the State University of Land Management (15, Kazakova Str., Moscow, 105064, Russian Federation; phone: (916) 856–19–96; E-mail: shevchukaa@guz.ru)