

ИНДУСТРИЯ 4.0 КАК СТРАТЕГИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В.Н. Башкин*

В статье рассмотрена применимость концепции «Индустрия 4.0» к ведению сельского хозяйства в целом и применению удобрений, в частности. Показаны возможности интеграции ИТ и коммуникационных технологий с сельскохозяйственным производством, когда «умные» сетевые системы, объединяющие различные типы данных из нескольких источников, помогают увеличивать производительность и эффективность. Даны примеры увеличения эффективности использования удобрений, прежде всего азотных, с использованием электронных двойников агрономических и агрохимических технологий для снижения их экологических последствий. Отмечено, что внедрение технологий Индустрии 4.0 повышает эффективность точного земледелия как сочетания лучших практик устойчивого земледелия (ЛПУЗ). Даны примеры оценки жизненного цикла удобрений с учётом риска эвтрофирования природных вод. Это позволяет добиваться экономической и экологической оптимизации сельского хозяйства.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, инновационные разработки, вычислительные платформы, электронные двойники, эффективность сельского хозяйства, точное земледелие.

Ссылка для цитирования: Башкин В.Н. Индустрия 4.0 как стратегия для увеличения эффективности сельского хозяйства // Жизнь Земли. 2024. Т. 46, № 3. С. 298–310. DOI: 10.29003/m4185.0514-7468.2023_46_3/298-310.

Поступила 02.07.2024 / Принята к публикации 28.08.2024

INDUSTRY 4.0 AS A STRATEGY FOR INCREASING AGRICULTURAL EFFICIENCY

V.N. Bashkin

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science,
Russian Academy of Sciences*

The article discusses the applicability of the Industry 4.0 concept to agriculture in general and fertilizer usage in particular. The possibilities of integrating IT and communication technologies with agricultural production are shown, when “smart” network systems combining various types of data from several sources help to increase productivity and efficiency. Examples are given of increasing the efficiency of fertilizer usage, primarily nitrogen ones, using electronic twins of agronomic and agrochemical technologies to reduce their environmental impacts. It is noted that the introduction of Industry 4.0 technologies increases the efficiency of precision farming as a combination of the best practices of sustainable agriculture (BPSA). Examples of assessing the life cycle of fertilizers considering the risk of eutrophication of natural waters are given. This allows achieving economic and environmental optimization of agriculture.

Keywords: Industry 4.0, innovative developments, computing platforms, electronic twins, agricultural efficiency, precision farming.

For citation: Bashkin, V.N., «Industry 4.0 as a strategy for increasing agricultural efficiency», *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* 46, no 3, 298–310 (2024) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m4185.0514-7468.2023_46_3/298-310.

* Башкин В.Н. – д.б.н., гл.н.с., Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Московская область, г. Пущино, vladimrbashkin@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-5656-3011.

Введение. Концепцию четвёртой промышленной революции (Индустрия 4.0) впервые сформулировали в 2011 г. как внедрение киберфизических систем в заводские процессы [6]. Предполагается, что эти системы объединятся в одну сеть, будут связываться друг с другом в режиме реального времени, самонастраиваться и учиться новым моделям поведения. Такие сети смогут выстраивать производство с меньшим количеством ошибок, взаимодействовать с производимыми товарами и при необходимости адаптироваться под новые потребности потребителей. Например, в процессе выпуска изделие само определит оборудование, способное произвести его. Предполагается, что всё это будет происходить в полностью автономном режиме без участия человека. Основу концепции Индустрии 4.0 составили четыре принципа:

- функциональная совместимость человека и машины, которая предоставляет возможность контактировать напрямую через Интернет;
- прозрачность информации и способность систем создавать виртуальную копию физического мира;
- техническая помощь машин человеку для объединения больших объёмов данных и выполнения ряда небезопасных для человека задач;
- способность систем самостоятельно и автономно принимать решения [4].

В конечном итоге практическое воплощение Индустрии 4.0 сводится к созданию как можно большего числа электронных двойников производственных процессов [1, 5] и соответствующих технологий.

Численность населения планеты растёт, а вместе с ней и мировой спрос на сельскохозяйственную продукцию. Фермеры в различных странах мира сталкиваются с необходимостью повышения производительности на гектар. Ситуация усугубляется колебаниями климата, а также ужесточением регулирования, например, пестицидов и удобрений. Цифровые технологии могут поддержать фермеров и облегчить их работу за счёт оптимизации операционных процедур и использования ресурсов или выполнения требований к большей прозрачности в сельскохозяйственной цепочке производственных значений. Развитие цифровых технологий означает, что агробизнесы могут повысить точность технологических процессов, которые используются для выращивания скота или управления пахотными землями, и производством в целом. Это стало возможным благодаря инновациям в современные системы, обеспечивающие создание электронных двойников с/х процессов. К ним относятся такие технологии, как, например, сенсорная технология, цифровое позиционирование, визуальные системы обнаружения или визуализации данных. Структурная трансформация в сельском хозяйстве также требует внедрения цифровых инноваций, которые более привлекательны, поскольку потенциальная экономия или рост производительности более значительны для крупных предприятий. В целом это позволит снизить неэффективность ряда производственных звеньев, улучшить этапы сложной цепочки создания стоимости в сельском хозяйстве в целом и устранить негативные внешние эффекты, такие как загрязнение окружающей среды и продуктов питания, и вопросы продовольственной и экологической безопасности.

Целью данной статьи является рассмотрение стратегических и тактических приёмов Индустрии 4.0 как набора электронных технологий для увеличения эффективности сельского хозяйства.

Создание электронных двойников производственных операций. Вычислительные платформы, как современные, так и особо следующего поколения, могут изучать сложные взаимодействия биофильных элементов (макро- и микроэлементов) в агроэкосистемах для информирования предпринимателей, определения приоритетов исследований и ре-

шения возникающих проблем. Эти вычислительные структуры включают статистические модели, модели механистического моделирования на основе процессов и их гибриды.

Такие инструменты поддержки принятия решений исследуют все аспекты агрогеохимии биофилов в интерфейсе почва–культура – от экспрессии генов, физиологии сельскохозяйственных культур и фенологии до почвенных процессов и прогностических оценок. Так, в рамках такого моделирования рассматриваются технологические аспекты внесения удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур в контексте генетических (G), экологических (E) и управленческих (M) факторов (G×E×M), которые контролируют взаимодействие между доступностью биофилов в почве, фенологии сельскохозяйственных культур, погоды и урожайности. Модели систем земледелия представляют собой интегрированные сборки моделей отдельных компонентов, которые учитывают конкретные биофизические компоненты (например, водный баланс, рост сельскохозяйственных культур и минерализацию органического вещества почвы). Они могут использоваться для разработки гипотез, их проверки и создания инструментов поддержки принятия решений, ориентированных на управление, которые повышают производительность, прибыльность и качество окружающей среды. Хотя статистические модели относительно просты в использовании и хорошо подходят для инструментов поддержки принятия решений, в отличие от моделей, основанных на процессах, они не могут экстраполироваться за пределы контекста (G×E×M), в котором они были разработаны. Следовательно, они не могут предсказать изменение величин эффективности удобрений в зависимости от незапрограммированных комбинаций (G×E×M). Тем не менее, их потенциал может быть существенным по двум причинам. Во-первых, одних экспериментов недостаточно для решения многих потенциальных комбинаций (G×E×M), возникающих в результате взаимодействия решений фермеров и погоды. В данном поле и в данном году результаты систем земледелия являются результатом миллиардов потенциальных комбинаций сотен переменных. Некоторые из них выбираются фермером (например, сорт, дата посадки, использование почвы и удобрений), в то время как другие зависят от погодных условий и климата (рис. 1).

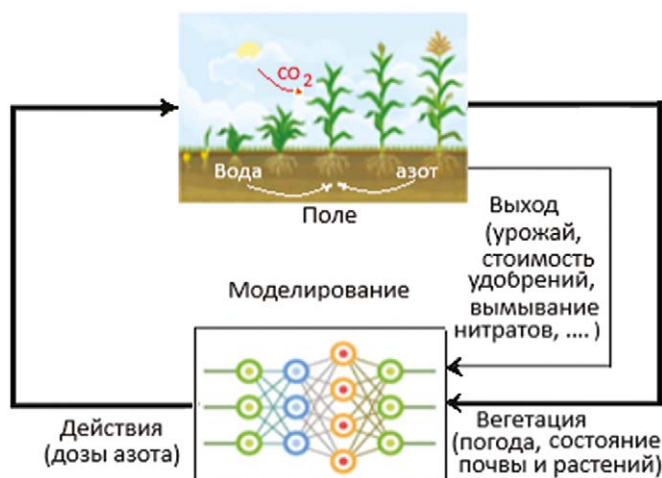


Рис. 1. Принципиальная схема создания электронного двойника технологии использования азотных удобрений.

Fig. 1. A principal scheme of designing an electronic twin of the nitrogen fertilizer usage technology.

Во-вторых, в теории могут быть рассмотрены новые стратегии управления системами удобрений и посевов для повышения эффективности полевых экспериментов и определения приоритетов исследований на основе анализа чувствительности, которые выявляют сценарии с серьёзными последствиями. Одновременно полевые эксперименты позволят выявить и восполнить пробелы в знаниях моделей. Потенциальные сценарии для систем возделывания сельскохозяйственных культур, управления азотом и/или водными ресурсами, по сути, будут разрабатываться в сотрудничестве с местными производителями, группами по сырьевым товарам и инициативными организациями. Однако при сравнении результатов моделирования различных сценариев управления следует учитывать неопределённость результатов, полученных в результате калибровочных и валидационных исследований.

При выборе сценариев управления для тестирования следует учитывать более значительные потенциальные различия. В наибольшей степени это касается учёта сочетанного действия экономических и экологических императивов. Например, достигнут значительный прогресс в разработке компьютерного моделирования для описания выбросов газообразного N_2O как парникового газа. В настоящий момент моделирование в основном используется для изучения того, как выбросы газов N_2O реагируют на изменения в управлении земельными ресурсами, структуре почвы и осадках, а также для описания того, как можно надёжно смоделировать ежегодные выбросы N_2O для некоторых местных управляемых агроэкосистем.

Снижение потерь азотсодержащих газов из почв в значительной степени зависит от управления земельными ресурсами, но обобщения, основанные исключительно на поступлении азотсодержащих веществ из почвы и воды, ограничены из-за дополнительной важности структуры почвы, уровня органического вещества в почве и сроков проведения мероприятий по управлению. Так, низкие выбросы азотсодержащих газов смоделированы на почвах с естественной растительностью, промежуточные выбросы – от сельского хозяйства в засушливых районах и высокие выбросы – от орошаемых сельскохозяйственных земель. Сезонные закономерности выбросов азотистых газов в агроэкосистемах и различия в средних выбросах между системами были смоделированы для местных пастбищных трав, озимой пшеницы/традиционная обработка почвы под пар и без обработки, озимая пшеница/кукуруза без обработки под пар, а также орошаемая кукуруза при выращивании на силос. Расход воды для орошения, обработка почвы, сроки посева/обработки под пар и внесение удобрений влияют на сокращение выбросов азотистых газов, что не позволяет обобщать информацию о землепользовании даже для различных регионов.

Эффективность использования удобрений, особенно азотных, в производственном сельском хозяйстве часто слишком низка, и в результате этого слишком велики потери избыточного азота в грунтовые воды в виде NO_3^- , газообразные выбросы NH_3 и N_2O , а также поверхностный сток и эрозия. Полевые исследования, направленные на изучение потенциальных ЛПУЗ, являются трудоёмкими и дорогостоящими и не могут охватить все сценарии.

Применение имитационных моделей, в частности, с компонентами цикла N, в сочетании с соответствующими полевыми исследованиями позволяет создать методологию, которая может помочь определить внутрихозяйственные ЛПУЗ для повышения эффективности использования удобрений, но при меньших затратах времени.

Заслуживающие доверия исследования ЛПУЗ с использованием инструментов моделирования должны проходить по чётко определённой пути, включающему выбор

модели, её адаптацию и калибровку, анализ чувствительности, требования к данным и их доступность, применение модели, а также интерпретацию результатов и ограничений. Важной частью этих исследований по моделированию ЛПУЗ является раннее и постоянное взаимодействие с местными производителями и программами полевых исследований.

Компьютерные модели могут служить инструментами для принятия управленческих решений на фермах, способствующих повышению эффективности использования навоза животноводства, прогнозированию качества воды и её защите, а также для содействия использованию ЛПУЗ в растениеводстве. Модели прогнозирования могут помочь в выявлении факторов уязвимости, связанных с выбросами парниковых газов. Растениеводам и животноводческим предприятиям всё чаще требуется разрабатывать планы рационального использования питательных веществ, чтобы продемонстрировать, что их предприятия располагают достаточными посевными площадями, сезонной доступностью земли, возможностями для хранения навоза и оборудованием для внесения удобрений. Необходимо обращение с навозом животных, коммерческими удобрениями и другими питательными ресурсами, используемыми на земле, экологически ответственным образом. Для разработки этих планов использовалось и будет использоваться компьютерное программное обеспечение, что позволяет создавать электронные двойники технологических процессов. Новое программное обеспечение для планирования рационального использования питательных веществ должно во всё большей степени учитывать временную и пространственную природу рационального использования питательных веществ, обеспечивать адаптацию к региональным условиям и меняющимся нормативным требованиям к отчётности, использовать национальные базы данных и стандарты, а также преимущества современных программных технологий, в т. ч. основанных на концепции Индустрия 4.0.

Точное земледелие. Точное земледелие – основанная на информации и технологиях система управления сельскохозяйственными ресурсами, которая направлена на использование технологий и технологических приёмов для выявления, анализа и управления пространственной и временной изменчивостью, связанной со всеми аспектами сельскохозяйственного производства на полях, для достижения максимальной прибыльности, устойчивости, повышения урожайности, защиты земельных ресурсов и поддержания или улучшения качества окружающей среды [3]. Точное земледелие является неременным компонентом применения Индустрии 4.0. в сельском хозяйстве.

Измерение изменчивости в полевых условиях в отношении питательных элементов и внесение нужного количества удобрений в нужное время с помощью механизмов с регулируемой нормой внесения, дистанционного зондирования, географических информационных систем (ГИС) и технологии глобальных систем позиционирования (GPS) могут стать важными информационными инструментами для фермеров, желающих повысить эффективность удобрений в конкретных условиях каждого поля.

Рассмотрим специфические приёмы управления удобрениями на примере азота. Компьютерное моделирование и модели поддержки принятия решений для систем «почва–культура», в которых наибольшее внимание уделяется азотному циклу, особенно в сочетании с экономическими и географическими информационными системами (ГИС), являются жизнеспособными альтернативами, которые могут способствовать оценке различных комбинаций сценариев управления и того, как они влияют на использование азота системой земледелия для данного набора условий. Эти модели представляют собой сложную серию алгоритмов и баз данных, которые могут взаимодействовать с

различными условиями и служить механическими инструментами для оценки различных сценариев. Также важен учёт эффективности использования питательных веществ, в частности азота (эффективность использования азота, ЭИА), и устойчивости системы (рис. 2).

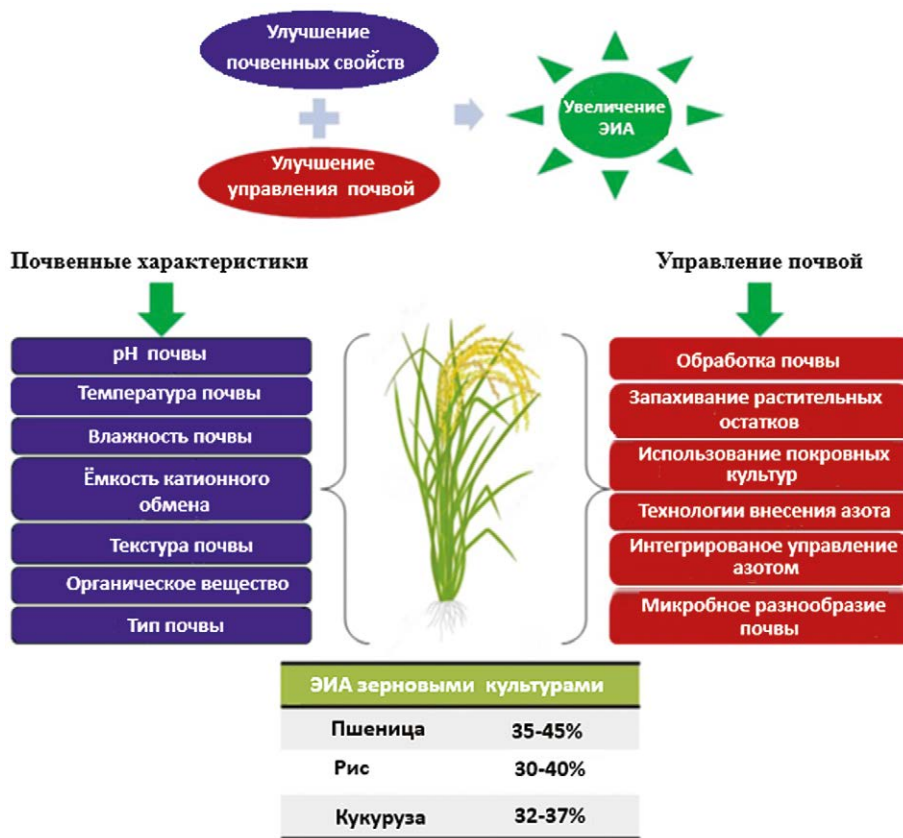


Рис. 2. Технологические параметры управления эффективностью использования азота (на основании [10]).

Fig. 2. Technological parameters of managing the nitrogen usage efficiency (from Ref. [10]).

Сайт-специфическое управление азотом. Технология управления потоками питательных элементов, в частности, азота, основана на стратегии управления азотом для конкретных полей (сайт-специфическое управление, ССУ). Она включает количественные данные о вариабельности потребностей сельскохозяйственных культур в азоте и ожидаемой азотминерализующей способности почвы. Фундаментальное предположение, лежащее в основе этой концепции, заключается в установлении оптимальной синхронизации между спросом и предложением азота для роста растений. В зависимости от того, когда и какие решения принимаются, ССУ можно разделить на две категории: 1) предписывающие ССУ, 2) корректирующие ССУ. При прежнем подходе к внесению удобрений количество и время их внесения анализируются перед посевом на основе питательной способности почвы (запасы минерального азота в слое 0–60 см), ожидаемого урожая, потребности в азоте для достижения предполагаемого целевого

уровня урожайности и ожидаемой эффективности используемых удобрений. В отличие от этого, стратегия корректирующего применения азота предполагает использование диагностических инструментов для оценки азотного статуса растений в течение их вегетации. Интерпретация этих данных служит основой для принятия решений о сроках и количестве внесения азота.

Датчики азота могут использоваться в сложных подходах к управлению для оценки потребностей сельскохозяйственных культур в дополнение к аналитическим агрохимическим методам. Грамотное управление азотом имеет важное значение в современных системах растениеводства для повышения долгосрочной устойчивости. Определение таких индексов, как содержание хлорофилла и цветовой гаммы листа, обеспечивает более высокую урожайность зерна и ЭИА по сравнению с рекомендациями по общему содержанию азота.

Дистанционное зондирование на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является перспективным подходом для неразрушающей и высокопроизводительной оценки эффективности использования воды и азота в сельскохозяйственных культурах. Так, БПЛА использовался для оценки результатов двух полевых опытов с использованием четырёх норм ирригации ($T_0 = 0$ мм, $T_1 = 80$ мм, $T_2 = 120$ мм и $T_3 = 160$ мм) и четырёх доз N ($T_0 = 0$, $T_1 = 120$ кг га⁻¹, $T_2 = 180$ кг га⁻¹ и $T_3 = 240$ кг га⁻¹) соответственно, на трёх генотипах пшеницы. Наземные данные о нормах орошения и такие показатели, как биомасса и содержание азота, также были измерены для подтверждения результатов воздушного наблюдения. Мультиспектральные характеристики, включающие красный нормализованный разностный растительный индекс (RNDVI), зелёный нормализованный разностный растительный индекс (GNDVI), нормализованный разностный индекс красного края (NDRE), индекс хлорофилла красного края (RECI) и нормализованный зелёно-красный разностный индекс (NGRDI), были зарегистрированы с помощью БПЛА в качестве надёжной замены разрушающих измерений, показывая высокие значения квадрата коэффициента корреляции (R^2) – до 0,90. NGRDI был определён как наиболее эффективный неразрушающий индикатор благодаря высоким прогнозируемым значениям, варьирующимся от $R^2 = 0,69$ – $0,89$ для эффективности водопользования (WUE), рассчитанной на основе биомассы (WUE.BM), и $R^2 = 0,80$ – $0,86$ для урожайности зерна (WUE.GY). RNDVI оказался лучшим в прогнозировании фенотипических вариаций эффективности использования азота, рассчитанных на основе содержания азота в образцах растений (NUE.NC) с высокими значениями R^2 в диапазоне от 0,72 до 0,94, в то время как NDRE был последовательным в прогнозировании обоих показателей NUE.NC и NUE.GY на уровень 0,73–0,84 с низкой среднеквадратичной ошибкой. Дистанционное зондирование с помощью БПЛА показывает, что внесение 180 кг N га⁻¹ при норме орошения 120 мм было наиболее подходящим для оптимального усвоения воды и азота. Из трёх сортов Zhongmai 895 был высокоэффективен (показатели WUE и NUE) при орошении и внесении азота. Таким образом, беспилотный летательный аппарат может быть использован для прогнозирования временных рядов эффективности использования воды и азота в течение сезона для отбора элитных генотипов и мониторинга эффективности выращивания в различных условиях [11].

Переход от равномерного внесения азота в полевых условиях, основанного на расчётах перед посадкой на основе баланса массы или экономичных подходов, к внесению азота с переменной нормой в течение сезона, основанному на измерении роста урожая, открывает перспективы для значительного улучшения оценки потребности растений в азоте, в частности, и других удобрений, в целом.

Можно привести пример использования технологий точного земледелия на Северо-Западе РФ [9]. При этом удобрения и другие ресурсы были аналогичны высокоинтенсивному земледелию, однако азотные (аммиачная селитра) и калийные (хлористый калий) удобрения вносились дифференцированно, с учётом неоднородного содержания азота и калия в почве, с использованием точных методов внесения. Минеральные удобрения были внесены следующим образом. В контрольном варианте (высокоинтенсивная технология) удобрения были равномерно распределены по всему полю. В опытных вариантах (технология точного земледелия) удобрения дифференцированы в зависимости от содержания питательных веществ в почве (исходные данные). Удобрение вносилось с помощью разбрасывателя твёрдых удобрений Amazon ZA-500 с бортовым компьютером и GPS. Также были вариации, основанные на усовершенствованных технологиях точного земледелия, которые применялись благодаря более информативному и дифференцированному внесению азота на основе оптических свойств пшеницы.

Окупаемость 1 кг питательных веществ удобрения для повышения урожайности зависит от доз, сроков их внесения и вида культуры. Авторы [9] установили, что дифференциальное внесение удобрений увеличивает окупаемость 1 кг азотного удобрения при увеличении урожайности зерна у обоих изучаемых сортов (с 27,7 % до 2,1 раза у сорта Эстер и с 43,5 % до 2,5 раза у сорта Красноуфимский-100). Величины эффективности азота возрастали почти в 2 раза, с менее 40 до почти 80 %.

Своевременный и недорогой доступ к адекватным пространственным данным о почвах в настоящее время является основным препятствием для дробного применения удобрений, но его можно устранить в течение следующего десятилетия. Ещё одним ограничением является наличие надёжных алгоритмов для выработки рекомендаций, которые надлежащим образом учитывали бы взаимодействие почвы и климата. Тот факт, что процессы усвоения азота растениями плохо синхронизированы с одноразовым внесением удобрений, свидетельствует о том, что улучшение синхронизации может снизить экологические риски. Это согласуется с устоявшимися принципами, согласно которым азот следует вносить в количестве, соответствующем требованиям культуры и в соответствии с потребностью в нём. Внесение азота с задержкой или многократное внесение с учётом потребности растений в азоте снижает потенциальные потери азота в окружающей среде, вызванные избытком воды, например, выщелачиванием и денитрификацией.

Сезонное управление с использованием датчиков (авиационных или наземных) также должно быть гибким, чтобы учитывать доступность оборудования и неопределённость погодных условий. Выращивание озимых и яровых однолетних культур или многолетних кормовых культур требует различных подходов к интерпретации данных датчиков из-за необходимости оценки таких факторов, как цвет почвы, растительный покров, содержание хлорофилла, индекс площади листьев, биомасса, концентрация антоцианов, высота растения и т. д. Таким образом, сезонные технологии и управленческие решения должны учитывать различное количество растительности на разных стадиях роста, и, вероятно, наилучшим образом им будут соответствовать различные вегетационные показатели, разработанные для конкретных культур в соответствии с конкретными методами производства (обработка почвы, дренаж почвы и т. д.). В будущем также следует лучше понимать азотминерализующую способность почвы, что позволит в дальнейшем использовать эту характеристику для технологии дробного применения азота и создания её электронных двойников в рамках Индустрии 4.0.

Следующее поколение стратегий управления с использованием датчиков урожая сейчас находится на стадии исследований и разработок, но для широкого использования

этих датчиков, вероятно, потребуются более убедительные причины для адаптации, т. е. причины, связанные с экологическими и экономическими проблемами. Будущие методы управления азотом, вероятно, будут опираться на ту или иную форму административной директивы по азоту. В настоящее время в ряде стран уже пришли к выводу, что вопрос сейчас не в том, будут ли приняты дополнительные меры политики, направленные на решение проблем, связанных с загрязнением азотом, а в том, какие именно. Аналогичным образом будущие методы управления азотом будут применяться в условиях удорожания энергии, что обязательно означает удорожание удобрений.

Комплексное регулирование содержания азота. Комплексное регулирование содержания азота предполагает оптимальное использование местных азотных компонентов, таких как растительные остатки, навоз, биологические источники фиксации азота, а также химические удобрения. При этом их взаимодополняющие взаимодействия способствуют увеличению использования азота. Положительный эффект от комплексного использования органического и неорганического азота достигается либо за счёт оптимальной физико-химической среды почвы, либо за счёт лучшего роста корней и увеличения поступления вторичных питательных веществ и микроэлементов. Правильное понимание и использование всех этих положительных взаимодействий между питательными веществами растений являются ключевыми для увеличения прибыли фермеров с точки зрения урожайности, а также качества почвы и количества вносимого азота. Взаимодополняющее использование азота вместе со вторичными биофильными элементами и некоторыми микроэлементами может привести к значительному повышению урожайности и ЭИА. Таким образом, сбалансированное и разумное использование азота всеми доступными способами приведёт к повышению урожайности благодаря дополнительному эффекту.

Комплексное использование азота и сбалансированное внесение удобрений улучшают не только производительность растений, но и эффективность производственной системы. Использование усовершенствованных научных разработок с применением местных технологий положительно влияет на эффективность. Оптимальные сроки, нормы, методы внесения и использование специально разработанных удобрений также являются необходимыми в системе точного земледелия. Различные виды удобрений, включая ингибиторы нитрификации, являются потенциальными средствами улучшения эффективности использования азота.

Кроме того, в этом отношении также могут помочь агрономические методы. Азот следует вносить в нужное время, в нужном месте и правильным способом. Таким образом, это позволяет растениям эффективно использовать азот. В настоящее время удобрения с замедленным высвобождением также используются для контроля потерь азота при выращивании растений. Кроме того, для лучшего развития растений необходимо регулирование физиологии самого растения, чтобы более эффективно использовать азот [7].

Биологизация удобрений. В последние 20 лет термин «биоудобрение» определяется по-разному, что связано с улучшением понимания взаимоотношений, происходящих между ризосферными микроорганизмами и растением. Биоудобрения можно определить как вещества, которые содержат живые микроорганизмы, колонизирующие ризосферу или внутреннюю часть растений и способствуют росту за счёт увеличения снабжения или доступности основных питательных веществ для целевых культур при внесении в почву, предпосевной обработке семян или при внекорневой подкормке растений [2]. По определению, биоудобрения являются веществом, содержащим живые микроорганизмы, которые при нанесении на семена, поверхность растений или почву

колонируют ризосферу или внутреннюю часть растения и способствуют росту за счёт увеличения запасов или доступности питательных веществ из первичных удобрений для растения-хозяина. В конечном итоге, биоудобрение определено как продукт, содержащий живые микроорганизмы, которые оказывают прямое или косвенное благотворное влияние на рост растений и урожайность сельскохозяйственных культур посредством различных механизмов.

Биоудобрения – это недорогие возобновляемые источники питательных веществ для растений, которые дополняют химические удобрения. Биоудобрения генерируют питательные вещества для растений, такие как азот и фосфор, в результате своей деятельности в почве или ризосфере и делают их доступными для растений.

Необходимо также увеличить вклад биологической фиксации азота (БФА) в производство продуктов питания и клетчатки. Показатели БФА в полевых условиях сильно различаются, и существует множество экологических/агрономических факторов, связанных с питанием растений, наличием воды и болезнями растений, которые мешают видам, фиксирующим азот, достигать свой потенциал урожайности.

Следовательно, новая политика в рамках Индустрии 4.0 в области удобрений основывается на альтернативах мочеvine (основное азотное удобрение), таких как специализированные, био- и наноудобрения, что может стать прорывом в повышении эффективности использования азота и снижении загрязнения его соединениями окружающей среды. Кроме того, на местном уровне может быть создана система поддержки принятия решений по внедрению передовых методов управления, которая может принести непосредственную пользу фермеру, повысив рентабельность и урожайность (ЛПУЗ). В конечном итоге, это должно быть учтено в технологиях соответствующих электронных двойников.

Управление жизненным циклом удобрений. Управление жизненным циклом продукта (УЖЦП) – это интегрированная информационная система, подход с конечной целью создания конкурентоспособной продукции, превосходящие показатели по различным аспектам, таким как прибыльность, клиентоориентированность, удовлетворённость, скорость выхода на рынок и экологичность. Система УЖЦП основана на данных обо всех этапах срока службы продукта, от разработки концепции до переработки. Таким образом, УЖЦП включает в себя управление данными о продуктах, процессах и инженерных проектах на уровне производства, цепочки поставок и маркетинга. Применение подходов УЖЦП продвигает устойчивые инновации посредством оптимизации конструкции продуктов и процессов, улучшение возможностей прогнозирования, улучшенное понимание рынка, производительность прототипирования и многое другое, и, что особенно важно, мониторинг выбросов, отходов, потребления ресурсов и мониторинг переработки. УЖЦП является прямой функцией трансформации Индустрии 4.0, учитывая, что производство более сложной продукции с более коротким жизненным циклом значительно увеличилось.

Рассмотрим в качестве примера оценку системы УЖЦП для управления экологическими рисками эвтрофирования поверхностных водных экосистем при применении азотных и фосфорных удобрений в агроэкосистемах. Интенсивное внесение азотных и фосфорных удобрений на сельскохозяйственных землях для подкормки выращиваемых культур привело к эвтрофикации, обогащению водоёмов питательными веществами, что сопровождается чрезмерным ростом водорослей, дезоксигенацией и утратой водного биоразнообразия. Оценка поведения удобрений на протяжении всего жизненного цикла часто используется для определения их воздействия на окружающую среду. Однако

отсутствие подходящих методик для оценки распределения и переноса питательных веществ из почвы затрудняет сравнение, особенно на уровне регионов. Используя недавно разработанную пространственно-ориентированную модель распределения и переноса питательных веществ (fate factor, FF), в рамках УЖЦП оценена глобальная пространственная изменчивость потерь питательных веществ в результате внесения удобрений под сельскохозяйственные культуры и их относительное воздействие на водное биоразнообразие, в частности, на богатство видов [8].

Показатели FF позволяют оценить судьбу N и P и их перенос из почв (пахотные земли, пастбища и природные угодья) в пресноводную среду. Результаты свидетельствуют о значительной вариабельности поступлений, нагрузок и воздействий, обусловленных различиями в распределении, транспортировке и воздействии питательных веществ в местном экологическом контексте. Такая изменчивость выражается в значительных различиях между широко используемым показателем эффективности использования питательных веществ и конечным воздействием конкретных культур на водные объекты. Высокоурожайные культуры (кукуруза, рис, пшеница, сахарный тростник и соя) с самыми высокими показателями вносимых удобрений не обязательно оказывали наибольшее воздействие на водные объекты. Выявлено, что на разных этапах оценки (внесение удобрений, выращивание культур, воздействие на водные объекты) существует вариабельность рангов, особенно для пшеницы и сахарного тростника. Показана высокая глобальная пространственная изменчивость воздействия на водное биоразнообразие со значительной потерей биоразнообразия за пределами регионов с наибольшим объёмом производства. Это позволяет заключить, что глобальные очаги воздействия на биоразнообразие зависят от местных условий, которые существуют за пределами поля (например, судьба и транспорт питательных веществ в рецепторную среду, а также уязвимость рецепторной среды). При принятии решений о стратегическом контроле за загрязнением окружающей среды удобрениями и поиске экологически устойчивых поставщиков растениеводческой продукции следует учитывать воздействие на водные ресурсы в результате использования удобрений для конкретных сельскохозяйственных культур. Разработка усовершенствованных FFs должна использоваться для обеспечения пространственно-ориентированных и привязанных к конкретному участку исследований миграции питательных веществ из почв.

Хотя на данном уровне развития модельных подходов к созданию цифровых двойников технологий внесения удобрений оценка их жизненного цикла ещё затруднена, в средне- и долгосрочной перспективе это будет обязательным компонентом применения Индустрии 4.0 в сельском хозяйстве.

Заключение. Концепция «Сельское хозяйство 4.0» опирается на термин «Индустрия 4.0» и относится к возросшей интеграции ИТ и коммуникационных технологий с сельскохозяйственным производством. «Умные» сетевые системы, объединяющие различные типы данных из нескольких источников, обещают увеличить производительность и эффективность. Другой особенностью является увеличение прозрачности вдоль цепочки создания стоимости. Это не просто сельское хозяйство, которое поставяет пищу и энергию, но и окружающая среда и, в конечном итоге, потребители. Это, по сути, модель будущего полностью автоматизированного и автономного сельского хозяйства.

Внедрение технологий Индустрии 4.0 повысит эффективность точного земледелия как лучших практик устойчивого земледелия, что ещё больше увеличит значимость природоохранной деятельности, как для крупных компаний, так и для малых и средних предприятий. Это может быть достигнуто путём использования лучших практик

устойчивого земледелия, ЛПУЗ. Такие практики могут работать только с использованием электронных двойников существующих агрономических и агрохимических технологий, что позволяет добиваться экономической и экологической оптимизации сельского хозяйства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н. Инновационное развитие ООО «Газпром добыча Ямбург». Сходство и различие в методах предупреждения потенциальных катастроф // Газовая промышленность. 2021. Спец. Выпуск 1 (184). С. 26–34
2. Башкин В.Н. Современные проблемы биологизации земледелия // Жизнь Земли. 2022. Т. 44, № 2. С. 180–191. DOI 10.29003/m3026.0514-7468.2022_44_2/180-191
3. Научно-обоснованный прогноз развития точного земледелия в России / Е.В. Рудой, М.С. Петухова, С.В. Рюмкин, Е.В. Труфляк, Н.Ю. Курченко. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2021. 138 с.
4. Юмаев Е.А. Инновационно-промышленная политика в свете перехода к Индустрии 4.0: зарубежные тенденции и вызовы для России // Журнал экономической теории. 2017. №2. С. 181–185
5. Bhagat P.R., Naz F., Magda R. Role of Industry 4.0 Technologies in enhancing sustainable firm performance and green practices // Acta Polytechnica Hungarica. 2022. Vol. 19, No. 8. P. 229–247
6. Fernandes J, Reis J, Melzo N, Teixeira L and Amorim M. The role of industry 4.0 and BPMN [business process model and notation] in the arise of condition-based and predictive maintenance: A case study in the automotive industry] // Applied Sciences, 2021, 11(8):3438.
7. Haroon M., Idrees F., Naushahi H. A. Afzal R., Usman M., Qadir T., Husnain R. Nitrogen use efficiency: farming practices and sustainability // J. of Experimental Agriculture International. 2019. 36 (3), 1–11. Article no. JEAI.48798. DOI: 10.9734/JEAI/2019/v36i330235.
8. Jwaideh M.A.A., Sutanudjaja E.H., Dalin C. Global impacts of nitrogen and phosphorus fertiliser use for major crops on aquatic biodiversity//The International J. of Life Cycle Assessment. 2022, 4 July. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02078-1>.
9. Lekomtsev P., Komarov A. Maintaining soil fertility by optimizing the use of nitrogen fertilizers in precision farming system // BIO Web of Conferences. 2023. 67, 02002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236702002>.
10. Mahboob W., Guozheng Yang, Muhammad Irfan. Crop nitrogen (N) utilization mechanism and strategies to improve N use efficiency // Acta Physiologiae Plantarum. 2023. V. 45:52. <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03527-6>.
11. Yang M, Hassan MA, Xu K, Zheng C, Rasheed A, Zhang Y, Jin X, Xia X, Xiao Y and He Z. Assessment of Water and Nitrogen Use Efficiencies Through UAV-Based Multispectral Phenotyping in Winter Wheat // Front. Plant Sci. 2020, 11:927. doi: 10.3389/fpls.2020.00927.

REFERENCES

1. Arno, O.B., Arabsky, A.K., Bashkin, V.N., “Innovative development of Gazprom Dobycha Yamburg LLC. Similarities and differences in methods of preventing potential disasters”, *Gas Industry*. 2021. Spec. Issue 1 (184), 26–34 (2021) (in Russian).
2. Bashkin, V.N., “Modern problems of biologization of agriculture”, *Zhizn' Zemli* [Life of the Earth] 44, no. 2, 180–191 (2022). DOI 10.29003/m3026.0514-7468.2022_44_2/180-191 (in Russian).
3. Rudoy, E.V., Petukhova, M.S., Ryumkin, S.V., Truflyak, E.V., Kurchenko N.Y., *A scientifically based forecast of the development of precision agriculture in Russia* (Novosibirsk: IC NGAU "Zolotoy Kolos", 2021) (in Russian).

4. Yumayev, E. A., “Innovation and industrial policy in the light of the transition to Industry 4.0: foreign trends and challenges for Russia”, *Zhurnal Ekonomicheskoy Teorii* [J. of Economic Theory] **2**, 181–185 (2017) (in Russian).
5. Bhagat, P.R., Naz, F., Magda, R., “Role of Industry 4.0 Technologies in Enhancing Sustainable Firm Performance and Green Practices”, *Acta Polytechnica Hungarica* **19** (8), 229–247 (2022).
6. Fernandes, J, Reis, J, Melro, N, Teixeira, L and Amorim, M., “The role of industry 4.0 and BPMN [business process model and notation] in the arise of condition-based and predictive maintenance: A case study in the automotive industry”, *Applied Sci.* **11** (8):3438.
7. Haroon, M., Idrees, F., Naushahi, H.A., Afzal, R., Usman, M., Qadir, T., Husnain, R., “Nitrogen use efficiency: farming practices and sustainability”, *J. of Experimental Agriculture Inter.* **36** (3), 1–11, Article no. JEAI.48798 (2019). DOI: 10.9734/JEAI/2019/v36i330235.
8. Jwaideh, M.A.A., Sutanudjaja, E.H., Dalin, C., “Global impacts of nitrogen and phosphorus fertiliser use for major crops on aquatic biodiversity”, *The Inter. J. of Life Cycle Assessment*, 2022, 4 July. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02078-1>.
9. Lekomtsev, P., Komarov, A., “Maintaining soil fertility by optimizing the use of nitrogen fertilizers in precision farming system”, *BIO Web of Conferences* **67**, 02002 (2023) <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236702002>.
10. Mahboob, W., Guozheng Yang, Muhammad Irfan, “Crop nitrogen (N) utilization mechanism and strategies to improve N use efficiency”, *Acta Physiologiae Plantarum* **45**:52 (2023), <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03527-6>.
11. Yang, M., Hassan, M.A., Xu, K., Zheng, C., Rasheed, A., Zhang, Y., Jin, X., Xia, X., Xiao, Y. and He, Z., “Assessment of Water and Nitrogen Use Efficiencies Through UAV-Based Multispectral Phenotyping in Winter Wheat”, *Front. Plant Sci.* **11**:927 (2020), doi: 10.3389/fpls.2020.00927.