

УДК 631.4:573.22:574.47:63.54
Научная специальность: 2.10.2

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2024

Индустрия 4.0: управление рисками применения азотных удобрений

Башкин В. Н.,

Институт физико-химических
и биологических проблем
почвоведения РАН,
142292, Россия,
Московская обл., г. Пушкино,
ул. Институтская, д. 2-1

Аннотация

Новые инновационные разработки по управлению азотом в эпоху Индустрии 4.0 — прогресс, возможности и вызовы для сельскохозяйственного земледелия, которые основаны на идеологии Индустрии 4.0 и решают ряд актуальных задач, в том числе:

1. Азот является важным, но, как правило, дефицитным питательным веществом для биологических систем. Однако массовое использование промышленных азотных удобрений удвоило потоки N в глобальном биогеохимическом цикле, превратив его в агрогеохимический цикл со многими экологическими последствиями.
2. Обзор текущих достижений и проблем, связанных с эффективностью использования азота (ЭИА) в сельском хозяйстве, и определение возможностей исследований в области агрогеохимии азота, круговорота почвы и агрономии для достижения устойчивого использования азота в сельском хозяйстве.
3. В качестве экологического показателя оценки ЭИА могут помочь фермерам оценить риск потерь N на фермах или полях. Это также может быть полезно для региональных оценок или оценок цепочки поставок. Технология дробного внесения удобрений позволяет существенно снизить потери азота.
4. Необходимо оценить азот-минерализующую способность почвы как основной показатель оценки потребности сельскохозяйственных культур в азоте в течение вегетационного периода.
5. Вычислительные платформы следующего поколения могут изучать сложные взаимодействия N в системах растениеводства, чтобы информировать руководство, определять приоритеты исследований и улучшать понимание сложностей. Эти вычислительные структуры включают статистические модели, модели механистического моделирования на основе почвенных процессов и их гибриды.
6. Такие инструменты поддержки принятия решений изучают все аспекты N на границе между почвой и сельскохозяйственными культурами: от экспрессии генов, физиологии сельскохозяйственных культур и фенологии до почвенных процессов и прогнозирования поведения. Точное земледелие на основании использования электронных двойников агрономических и агрохимических процессов как Индустрии 4.0.

Ключевые слова: управление азотом; Индустрия 4.0; инновационные разработки; вычислительные платформы; эффективность использования азота; устойчивое использование азота; точное земледелие; экологические риски.

Для цитирования: Башкин В.Н. Индустрия 4.0: управление рисками применения азотных удобрений // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 4. С. 68–81.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Industry 4.0: Risk Management of Nitrogen Fertilizers

Vladimir N. Bashkin,

Institute of Physicochemical
and Biological Problems in Soil
Science RAS,

Institutskaya str., 2-1,
Pushchino, Moscow region,
142290, Russia

Abstract

New, innovative developments for nitrogen management in the era of Industry 4.0: progress, opportunities and challenges for agricultural farming, are based on the Industry 4.0 ideology and solving a number of pressing problems, including:

1. Nitrogen is an important but generally scarce nutrient for biological systems. However, the massive use of industrial nitrogen fertilizers has doubled N flows in its global biogeochemical cycle, transforming it into an agrogeochemical cycle, with many environmental consequences.
2. Reviews current advances and challenges related to nitrogen use efficiency (NUE) in agriculture and identifying research opportunities in nitrogen agrogeochemistry, soil cycling, and agronomy to achieve sustainable N use in agriculture.
3. As an environmental indicator, NUE assessments can help farmers assess the risk of N losses on farms or fields. This may also be useful for regional or supply chain assessments. The technology of fractional fertilization can significantly reduce nitrogen losses.
4. It is necessary to assess the nitrogen-mineralizing capacity of the soil as a basic indicator to assess the nitrogen demand of crops during the growing season.
5. Next generation computing platforms can study complex N interactions in crop systems to inform management, identify research priorities, and improve understanding of complexities. These computational frameworks include statistical models, process-based mechanistic modeling models, and hybrids thereof.
6. Such decision support tools examine all aspects of N at the soil-crop interface: from gene expression, crop physiology and phenology to soil processes and behavior prediction. Precision agriculture based on the use of electronic counterparts of agronomic and agrochemical processes as Industry 4.0.

Keywords: nitrogen management; Industry 4.0; innovative developments; computing platforms; nitrogen use efficiency; sustainable N use; precise farming; ecological risks.

For citation: Bashkin V.N. Industry 4.0: risk management of nitrogen fertilizers // Issues of Risk Analysis. 2024;21(4):68–81. (In Russ.)

The author declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Эффективность использования азота в сельском хозяйстве
2. Вычислительные платформы для изучения сложных взаимодействий N в системах растениеводства
3. Точное земледелие как прием управления рисками применения азотных удобрений

Заключение

Список источников

Введение

В настоящее время в России уже существует несколько правительственных постановлений в конкретных областях Индустрии 4.0, включая национальную стратегию развития искусственного интеллекта до 2030 г., утвержденную указом Президента от 10.10.2019 № 490. Указ определяет цели, ключевые направления и механизмы развития искусственного интеллекта, также как и Федеральный проект по искусственному интеллекту, одобренный 27.08.2020 г. Президиумом Правительственной комиссии по использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и бизнес-среды, направленный на реализацию этой стратегии и, соответственно, концепцию развития регулирования отношений в области технологий искусственного интеллекта и робототехники до 2024 г., утвержденную распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.08.2020 № 2129-р.

При этом Индустрия 4.0 включает в себя прежде всего цифровые технологии в качестве электронных двойников реальных производственных процессов [1]. Такой подход позволяет активно трансформировать управление различными видами производственной деятельности. Для сельского хозяйства эти технологии предлагают новые возможности для повышения эффективности, устойчивости и доходности аграрных предприятий. Показано, что использование современных технологий в аграрном секторе повышает производительность и улучшает финансовые показатели хозяйств. Также следует подчеркнуть важность управления различными рисками, в частности, экологическими. В целом, применение технологий Индустрии 4.0 способствует устойчивому развитию агросектора, делая его более адаптируемым к изменениям климата и экологически безопасным.

Один из примеров применения технологий Индустрии 4.0 — это сервис Granular для «умного» управления сельскохозяйственным производством. Он помогает фермерам планировать производство и его бюджет, управлять ресурсами и командой, анализировать процессы и улучшать их. Важным является и управление различными рисками: финансовыми, логистическими, производственными в целом и экологическими.

К числу основных экологических рисков, связанных с сельским хозяйством, относятся риски применения азотных удобрений. Азот — основной питательный элемент, формирующий урожай всех

сельскохозяйственных культур. Применение азотных минеральных удобрений является фактором, определяющим продовольственную безопасность во всех регионах Земли. Однако при этом азот обладает ярко выраженной полифункциональностью, будучи как биофильным элементом, так и элементом поллютантом [2]. Это связано с тем, что азот является важным, но, как правило, дефицитным питательным веществом для биологических систем. Однако массовое использование промышленных азотных удобрений удвоило потоки N в глобальном биогеохимическом цикле, превратив его в агрогеохимический цикл со многими экологическими последствиями (рис. 1).

Цель этой работы заключается в оценке методов управления экологическими рисками, связанными с использованием азотных удобрений, посредством применения подходов Индустрии 4.0. Среди этих подходов можно выделить:

- эффективность использования азота в агроэкосистемах;
- прогноз оценки потребности растений в азоте;
- современные приемы биологизации круговорота азота;
- вычислительные платформы для изучения сложных взаимодействий N в системах растениеводства;
- точное земледелие как прием управления рисками применения азотных удобрений.

При этом необходимо создание электронных двойников желательны для всех технологических процессов, чтобы информировать фермеров об агрономической, агрохимической и экологической оптимизации применяемых азотных удобрений.

1. Эффективность использования азота в сельском хозяйстве

Эффективность использования азота (ЭИА) можно рассматривать как индикатор воздействия на окружающую среду, определяющий потенциальный экологический риск рассматриваемой агроэкосистемы [3]. Эффективность использования азота (Nitrogen use efficiency, NUE) определяется как соотношение количества азота, поступающего на вход агроэкосистемы (ферма, ландшафт, речной бассейн, административный регион), и количества азота в получаемых продуктах на выходе системы:

$$\text{ЭИА} = N_{\text{вых}}/N_{\text{вх}}.$$

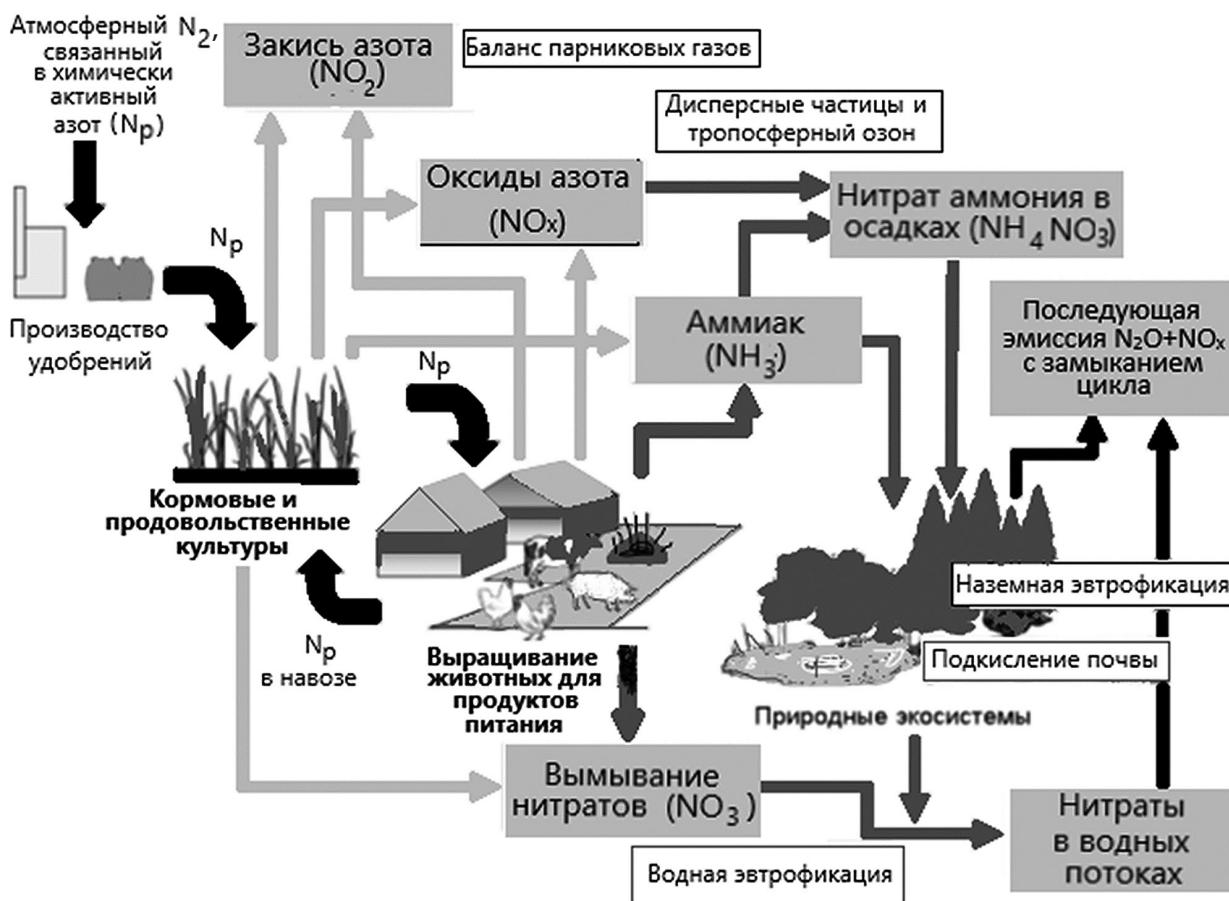


Рис. 1. Производственный цикл азота в агроэкосистемах и нарушения биогеохимического круговорота

Figure 1. Nitrogen production cycle in agroecosystems and violations of the biogeochemical cycle

На рис. 2 показана принципиальная схема оценки величин ЭИА. В настоящее время в среднем по миру величины ЭИА составляют не более 40%, будучи несколько большими в странах с устойчивым развитием агроэкосистем (Западная Европа, Северная Америка), и существенно меньшими в странах, в основном полагающихся на интенсивное внесение азотных удобрений (Южная и Юго-Восточная Азия). Низкие величины ЭИА сопровождаются избыточным накоплением соединений реактивного азота (N_p см. рис. 1) в почве, природных водах, атмосфере и продуктах питания [4]. Полученные нами производственные экспериментальные данные свидетельствуют о значительном изменении величин ЭИА от 15 до 80%. Причем максимальное использование азота капустой в производственных условиях было

достигнуто при внесении оптимальной дозы азота: 200 кг/га удобрений и величине азот-минерализующей способности (АМС) 390 кг/га. Это соответствовало также и максимальному урожаю (120,5 т/га). С учетом последствий внесенных удобрений дозы вновь вносимого азота могут быть существенно меньшими (от 50 до 125 кг/га), и это будет соответствовать суммарным величинам ЭИА от 34 до 48% [5].

Если же рассматривать величины ЭИА на ландшафтном уровне, т.е. принимая во внимание полный биогеохимический круговорот азота (см. рис. 1), то эти величины будут изменяться от отрицательных величин при низких дозах вносимых минеральных удобрений до положительных, т.е. от -0,5–20% до +55–60% для агроландшафтов в зонах интенсивного земледелия в средней полосе ЕТР.

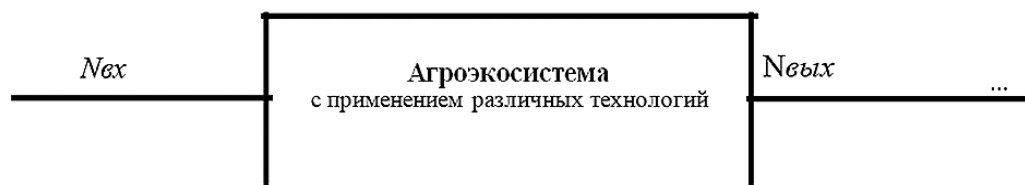


Рис. 2. Оценка величин эффективности использования азота

Figure 2. Estimation of nitrogen use efficiency (NUE) values

Организация эффективного использования навоза как удобрения, содержащего азот в минеральной и органической форме, является основной экологической проблемой животноводства, в частности в Ленинградской области, так как азот навоза считается основным источником загрязнения. Поэтому необходимо определение исходных данных для принятия комплексных решений по управлению навозом животных и птицы, создания централизованной системы управления с целью снижения потерь азота и уменьшения экологических рисков. В качестве показателей можно использовать значения эффективности использования азота, рассчитываемые на уровне региона и муниципальных районов. На региональном уровне величины ЭИА составили 34%, а избыток азота — 103 кг N/га в год. В одиннадцати муниципальных районах средняя величина ЭИА составила 59%, средний избыток азота — 40 кг N/га в год. Четыре района были определены как «горячие точки» с величинами ЭИА от 1 до 37% и избытком азота от 87 до 3082 кг N/га в год. Предложен сценарий перераспределения органических удобрений между «горячими точками» и «экологически чистыми» районами [6].

В связи с относительно низкими величинами ЭИА для различных агросистем дальнейшие потери N происходят по биогеохимическим (агрогеохимическим) цепям до того, как он будет потреблен. Повышение ЭИА представляет собой одно из четырех основных направлений деятельности, определенных для уменьшения потерь N в окружающей среде. Другие три смещаются либо (2) в диетическую сторону — большее потребление растительных продуктов в странах с высоким уровнем доходов, либо (3) в сторону сокращения потерь продовольствия и сокращения пищевых отходов и/или (4) сокращения производства биотоплива из пищевых продуктов.

Среди обсуждаемых в современной научной литературе соответствующих подходов к управлению

агрогеохимическими потоками азота с использованием перспективных направлений исследований и разработок (НИОКР) для решения этих проблем могут быть выделены четыре широкие области: круговорот азота в почве, системная агрономия, биологическая фиксация азота (БФА) и селекция (генетика) растений. Все эти направления укладываются в парадигму Индустрии 4.0, а ее применение в сельском хозяйстве в целом и для управления потоками азота в агроэкосистемах в особой степени в виде электронных двойников технологических операций очень актуально.

Прогноз оценки потребности сельскохозяйственных культур в азоте

Азот используется наиболее эффективно, когда его доступность в почве синхронизирована с потреблением растений. Такая синхронизация является сложной технологической задачей, особенно для однолетних культур, типичных для большинства высокопродуктивных сельскохозяйственных оборотов. Например, многие зерновые культуры имеют вегетационный период 90–100 дней, при этом они поглощают N и накапливают биомассу со значительной скоростью лишь в определенный период (30–40 дней в середине сезона). В частности, в посевах кукурузы скорость поглощения N достигает 5 кг/га в сут. в течение 3–4 недель и может быстро снизиться. Между тем, минерализация азота в почве протекает в течение всего вегетационного сезона, когда почва не слишком сухая или слишком холодная для поддержания биологической активности. Эта асинхронность между тем, когда азот доступен и когда он необходим, создает возможность потери N и является основной причиной низкой величины ЭИА в большинстве агрономических систем.

В зависимости от системы севооборотов и окружающей среды достижение синхронности может быть сложной задачей из-за изменчивой погоды, сроков поставки оборудования и наличия рабочей силы, а также других ограничений и источников неопределенности.

Во-первых, спрос растений на N трудно предсказать на основе данных, имеющихся в момент принятия решения об удобрении, и возможных будущих погодных сценариев. Потребность в азоте также может сильно варьироваться в зависимости от комплексности ландшафтов в течение определенного года и даже из года в год в одном и том же месте. Во-вторых, оценка скорости потоков N в его почвенном агрогеохимическом цикле затруднена, особенно в условиях умеренного климата. В этих регионах поступление азота вследствие минерализации органического вещества почвы и его удаление в результате денитрификации и вымывания в грунтовые воды сильно варьируются от года к году и от поля к полю. Решение этих проблем, присущих различным системам земледелия, остается сложной задачей.

Одним из способов их решения может быть определение азот-минерализующей способности почв (АМС). Величины АМС включают в себя суммарную оценку трансформации азота в почве под воздействием доз удобрений, гидротермических параметров (температура, осадки), агрохимических показателей почвы, микробиологической активности и др. АМС — количество органического азота в почве, способного к минерализации в течение прогнозируемого вегетационного сезона. Эти величины будут включать в себя азот, поглощенный растениями, реиммобилизуемый микроорганизмами, теряемый при вымывании и денитрификации, а также остающийся в доступной форме после окончания периода вегетации. Количественная оценка АМС почвы, которая является важнейшим критерием степени выраженности агрогеохимического цикла азота, может быть выполнена на основании метода определения минерализуемого азота почвы, эквивалентного по доступности азоту удобрений, проводимого в условиях компостирования образцов с возрастающими дозами азотных удобрений. Компостирование образцов почвы проводится при оптимальных условиях температуры (18–28°C) и влажности (60% ППВ) в течение четырех недель с набором (4–6) доз азотных удобрений, эквивалентных планируемому под различные сельскохозяйственные культуры. Сама величина АМС определяется путем нахождения первой производной квадратического уравнения регрессии, описывающего накопление доступного азота (нитраты и обменный аммоний) в почве в зависимости от доз вносимых азотных удобрений. Созданы соответствующие базы данных для различных

почвенно-климатических регионов, что позволяет включать их в модели для оценки потребности в азоте на планируемый вегетационный период [7]. Это дает возможность создавать электронные двойники агрохимических технологий определения доз азота.

Современные проблемы биологизации азотного цикла

В последние годы достижения в области молекулярной биологии и современные инструменты редактирования генома могут обеспечить биологизацию азотного цикла путем выведения сортов с улучшенным ЭИА, хотя для достижения этих целей необходимы дальнейшие исследования. Интеграция всех этих подходов приведет к устойчивому производству сельскохозяйственных культур за счет эффективного управления экологическими стрессами в условиях нынешнего сценария изменения климата. Кроме того, эпигенетика растений, которая представляет собой консервативный механизм регуляции экспрессии генов, включающий модификацию гистонов, метилирование ДНК, некодирующую РНК и ремоделирование хроматина, может рассматриваться как новый и эффективный инструмент для увеличения ЭИА в агроэкосистемах [8].

Так, концепция азотфиксирующей пшеницы в целом — благородное стремление, которое произвело бы революцию в выращивании зерновых культур, но ее практическая реализация требует больших затрат. Несмотря на десятилетия исследований, процессы, связанные как с симбиозом фитобактерий, так и с самим процессом азотфиксации, все еще относительно плохо изучены. Исследования на базовом уровне уже дают представление о возможных механизмах преодоления проблем, связанных как с созданием искусственных симбиозов, так и с подходами к генетической модификации для обеспечения биологической фиксации азота. Однако все еще существует большой разрыв между текущими успехами в разработке модельных систем и реальным переходом к внедрению этих систем на растениях пшеницы [9].

Также неизвестно, в какой степени предлагаемые методы улучшат урожайность пшеницы. Исследования с трансгенными видами *E. coli* продемонстрировали очень низкую нитрогеназную активность, составляющую около 10% от таковой у нативной *Paenibacillus sp. WLY78*. Этого недостаточно для обеспечения полного диазотрофного роста, но все же может быть использовано в качестве средства снижения

количества азота, требуемого из других источников (таких как традиционные удобрения). Тем не менее, потенциальный конечный результат оправдывает средства. На данном этапе развития биотехнологии можно ожидать определенных успехов в разработке азотфиксирующей пшеницы. Независимо от того, возможно ли выращивать культуры, которые выживают исключительно за счет использования N_2 из воздуха в качестве источника азота, или же результатом является лишь незначительное повышение урожайности пшеницы, необходимость улучшения мирового производства продовольствия требует проведения таких исследований.

Также важными являются исследования, направленные на оценку ассоциаций азотфиксирующих бактерий при их комбинациях с азотом минеральных удобрений при выращивании риса [10]. Были внесены *Klebsiella pneumonia* и *Azospirillum brasilense*, а мочевины использовались в качестве удобрения в дозах 0, 25, 50 и 75 кг/га. В результате выявлено, что инокуляция азотфиксирующими бактериями суходольного риса может увеличить образование побегов, стеблей, вес высушенных корней и совокупный объем биомассы растений. Влияние *A. brasilense* на увеличение кущения, сухой массы биомассы (побегов и корней) и общего потребления азота показало тенденцию к увеличению по сравнению с *K. pneumonia*. Различия в азотных удобрениях не оказали существенного влияния на все измеренные параметры, за исключением содержания азота в растениях. Взаимодействие бактерий и азотных удобрений не оказало существенного воздействия на все измеренные параметры.

Оценивая потенциальную важность приемов, направленных на биологизацию азотного цикла при выращивании основных зерновых культур в агроэкосистемах, следует подчеркнуть, что для доведения этих научных исследований до технологий Индустрии 4.0 еще потребуется много усилий, и это скорее средне- и даже дальнесрочная перспектива.

Более реальным является применение биоудобрений, таких как специализированные, био- и наноудобрения, что может стать прорывом в повышении эффективности использования азота и снижении загрязнения азотными соединениями. Такие технологии уже созданы и позволяют использовать эти технологические приемы при внесении азота для выращивания сельскохозяйственных культур.

2. Вычислительные платформы для изучения сложных взаимодействий N в системах растениеводства

Компьютерные модели могут служить инструментами для принятия управленческих решений на фермах, способствующими повышению эффективности использования азота для животноводства, прогнозированию качества воды и ее защите, а также для содействия использованию лучших практик устойчивого земледелия (ЛПУЗ) в растениеводстве.

Модели прогнозирования могут помочь в выявлении факторов уязвимости, связанных с выбросами азота и парниковых газов. Растениеводам и животноводческим предприятиям все 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. Обращение с коммерческими удобрениями и другими питательными ресурсами, используемыми на полях, должно быть организовано как экономически, так и экологически ответственным образом. Для разработки этих планов использовалось и будет использоваться компьютерное программное обеспечение. Новое программное обеспечение для планирования рационального использования питательных веществ во все большей степени должно:

- учитывать временную и пространственную природу рационального использования питательных веществ;
- обеспечивать адаптацию к региональным условиям и меняющимся нормативным требованиям к отчетности;
- использовать национальные базы данных и стандарты, а также использовать преимущества современных программных технологий, в том числе основанных на принципах Индустрии 4.0.

Современные модельные подходы, включающие в себя элементы искусственного интеллекта, показаны на рис. 3.

Потенциальные сценарии для систем возделывания сельскохозяйственных культур, управления азотом и/или водными ресурсами, по сути, должны разрабатываться в сотрудничестве с местными производителями, группами по сырьевым товарам и инициативными

организациями. Однако при сравнении результатов моделирования различных сценариев управления следует учитывать неопределенность результатов, полученных в результате калибровочных и валидационных исследований. При выборе сценариев управления, включая экологические риски, необходимо принимать во внимание еще более значительные потенциальные различия.

Наблюдается значительный прогресс в разработке компьютерного моделирования, например, для описания выбросов газообразного N_2O . В настоящий момент моделирование в основном используется для изучения того, как выбросы газов N_2O связаны с изменениями в управлении земельными ресурсами, структурой почвы и величиной осадков, а также для описания того, как можно надежно смоделировать ежегодные выбросы N_2O для некоторых местных и управляемых систем.

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, имеют ограниченное применение из-за необходимости учета таких важных факторов, как структура почвы, содержание органического вещества в почве и сроки проведения агротехнических и агрохимических мероприятий. Были смоделированы низкие выбросы азотсодержащих газов из почв с естественной растительностью, промежуточные выбросы от сельского хозяйства в засушливых районах и высокие выбросы от орошаемых сельскохозяйственных

земель. Сезонные закономерности выбросов азотистых газов в системах 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 и выращивание силоса. Расход воды, обработка почвы, сроки посева/обработки под пар и внесение удобрений влияют на сокращение выбросов азотистых газов, что в целом еще затрудняет корректно обобщать информацию о землепользовании. Величины ЭИА в производственном сельском хозяйстве часто низкие, 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 технологических приемов с использованием ЛПУЗ, являются трудоемкими и дорогостоящими и не могут охватить все сценарии.

Применение имитационных моделей с компонентами циклирования N в сочетании с соответствующими полевыми исследованиями предлагает методологию, которая может помочь определить внутрихозяйственные ЛПУЗ, позволяющие повысить эффективность использования азота, но при меньших затратах времени. Заслуживающие доверия исследования ЛПУЗ с использованием инструментов моделирования должны проходить по четко определенному пути, включающему: выбор модели и ее применимость; адаптацию и калибровку; анализ чувствительности; требования

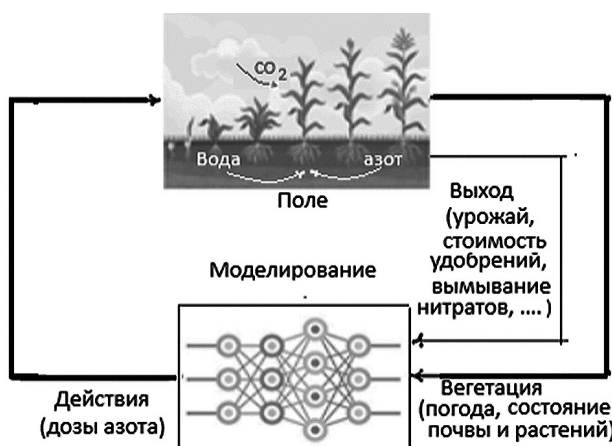


Рис. 3. Схема работы электронного двойника для применения азотных удобрений на основании Индустрии 4.0

Figure 3. The scheme of operation of the electronic twin for the application of nitrogen fertilizers based on Industry 4.0

к данным и их доступность, а также интерпретацию результатов и ограничений модели.

Важной частью исследований по моделированию ЛПУЗ является раннее и постоянное взаимодействие с местными производителями и программами полевых исследований для конкретных фермерских хозяйств, чтобы создавать электронные двойники этих технологий.

3. Точное земледелие как прием управления рисками применения азотных удобрений

Диффузное загрязнение, вызванное использованием удобрений в сельском хозяйстве, стало глобальной проблемой, которую трудно решить. На основе систематического анализа опубликованных документов проанализирована взаимосвязь между эффективностью использования азотных удобрений, ЭИА, точечным загрязнением, политикой и методами управления фермерами. Низкий уровень ЭИА (около 40% по всему миру) приводит к тому, что около 60% азота является потенциальным источником загрязнения окружающей среды. Многочисленные исследования показывают прямую взаимосвязь между внесением азотных удобрений в сельском хозяйстве и диффузным загрязнением в результате испарения, выщелачивания и стока. Ключом к снижению экологических рисков такого загрязнения является повышение ЭИА. Существует также множество литературы, посвященной описанию, разработке и демонстрации эффективности методов и процедур, которые помогают улучшить ЭИА и уменьшить его негативные последствия как на местном, так и на глобальном уровне [4]. В определенной части они уже были включены в законодательство некоторых стран (в основном в Европейском союзе). Однако эти стандарты не были приняты фермерами в целом, и они неохотно применяют их на практике. Существующие исследования в этой области связывают такое поведение фермеров с отсутствием их осведомленности, что и предопределяет их неготовность к изменениям в агрономических и агрохимических практиках управления производством. В некоторых исследованиях сообщается об оборонительной позиции фермеров, вызванной именно недостатком информации о реальности и масштабе проблемы, вызванной внесением азотных удобрений. Демонстрация экологических проблем при текущем уровне

диффузного загрязнения азотом окружающей среды позволяют лучше понять факторы, влияющие на методы управления фермерами [11]. Такой подход позволит разработать более эффективную политику для повсеместного внедрения лучших систем управления внесением азота и в конечном счете приведет к снижению диффузного загрязнения азотом за счет улучшения ЭИА. Это снизит и вероятность проявления соответствующих экологических рисков (рис. 4).

Точное земледелие использует инновационные технологии для улучшения ЛПУЗ и объединяет их с руководящими принципами сельского хозяйства. Система возделывания должна соответствовать фундаментальным принципам, которые в целом определяют основные стандарты устойчивого развития. Далее следуют принципы точного земледелия:

- точное земледелие может улучшить управление почвой и севооборот при сохранении качества почвы и доступности воды для поддержания сельскохозяйственного производства в долгосрочной перспективе;
- устойчивое сельское хозяйство может защищать, перерабатывать, заменять и поддерживать природную ресурсную базу, включая почвы, воды и биоразнообразие, способствуя сохранению природного капитала.

При этом точное земледелие — сочетание различных достижений Индустрии 4.0. Это множество комбинаций, как правило, взаимосвязанных и требующих постоянного усовершенствования. Рассмотрим сочетание различных технологий, позволяющих создавать их электронные двойники:

- глобальная система позиционирования (GPS), включающая набор из 24 спутников, расположенных по окружности Земли, сигналы которых могут быть обработаны наземным получателем для определения географического местоположения. При этом вероятность того, что данная ситуация на Земле будет в пределах 10–15 метров от реального положения, составляет 95%. GPS позволяет точно отобразить местоположение ферм и наряду с соответствующим программированием информирует владельца о состоянии выращиваемых растений и о необходимости применения агрономических и агрохимических операций;
- географическая информационная система (ГИС), представляющая собой программное обеспечение, которое импортирует, экспортирует и оперирует пространственно-временной географической

информацией, позволяющей изучать различные варианты управления фермой, просматривая слои информации и соответствующие им технологические приемы;

- выборка в виде сетки, соответствующей разбивке поля на матрицы площадью около 0,5–5 га. Отбор проб почвы внутри ячеек сетки помогает определить оптимальные дозы внесения удобрения. С каждой ячейки отбирается несколько образцов, которые смешиваются и отправляются в исследовательскую лабораторию для изучения;

- технология переменной дозы (Variable Rate Technology, VRT) включает в себя современное полевое оборудование с дополнительным электронным блоком управления (ЭБУ) и установленным GPS, что может удовлетворять требованиям к информации о переменных дозах внесения азотных удобрений и/или нормам орошения. Разбрызгиватели, вращающийся дисковый агрегат с ЭБУ и GPS успешно использовались для регулярного полива. При составлении карты необходимых питательных веществ для VRT следует учитывать не столько норму внесения удобрений, повышающую урожайность, сколько норму внесения

удобрений, повышающих агрономическую и экологическую эффективность;

- карты урожайности, которые создаются путем обработки информации с регулируемой жатки комбайна, оснащенной GPS, например, в сочетании с системой регистрации урожайности. Карта урожайности включает в себя регистрацию перемещения зерна через жатку с одновременным сохранением реального местоположения на поле;

- дистанционные датчики, представляющие по большому счету, классы воздушных или спутниковых датчиков. Они могут отображать: различия в оттенках поля в соответствии с изменениями типа почвы и в уровнях урожая; границы полей, лесополосы; оросительные каналы и т.д. Можно использовать аэрофотоснимки и спутниковые снимки, чтобы составить электронные карты, отражающие состояние растений;

- непосредственные датчики, которые используются для количественной оценки параметров почвы, таких как содержание азота и pH почвы и параметров урожая при движении по полю трактора, подключенного к датчику;

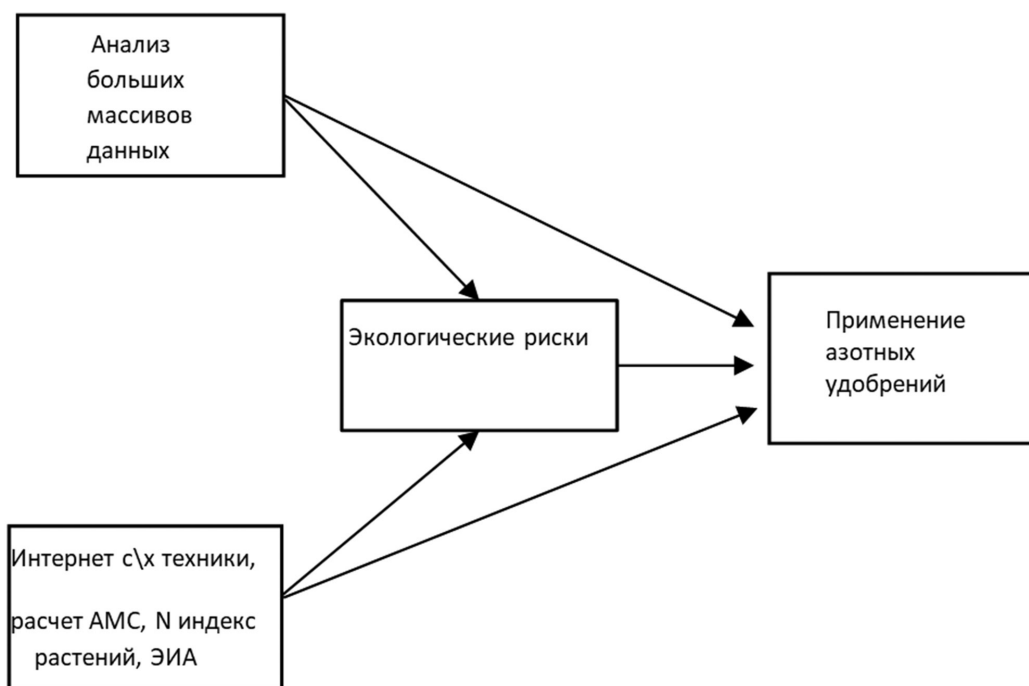


Рис. 4. Управление экологическими рисками азотных удобрений на базе концепции «Индустрия 4.0» и технологий точного земледелия

Figure 4. Management of environmental risks of nitrogen fertilizers based on the concept of "Industry 4.0" and precision farming technologies

- компьютерное оборудование и программное обеспечение для проверки информации, объединенной с другими инновационными компонентами точного земледелия и доступной в удобном для использования виде, например, в виде карт, диаграмм, набросков или отчетов;

- системы точного орошения в последнее время усовершенствуются для коммерческого использования в системах спринклерного орошения, позволяющих управлять движением поливных машин с помощью регуляторов на основе GPS. Разрабатываются системы удаленного управления и датчики для мониторинга почвы и растений, включая водный и азотный индекс, а также для окружающих условий и границ полива.

Одним из главных преимуществ точного земледелия является возможность значительного снижения доз вносимых азотных, фосфорных и других удобрений, также как и норм внесения гербицидов, навоза и семян. Используя датчики и программы, позволяющие сосредоточиться на получении экономически и экологически оптимального урожая, фермеры могут получать информацию о том, сколько минеральных и органических удобрений необходимо вносить в рамках ЛПУЗ. Эти данные также могут быть полезны для прогнозирования в долгосрочной перспективе [12].

Различия в данных о растениях и почве также могут быть использованы для определения зоны управления полевыми контурами с помощью сочетания методов зондирования, геостатистики и интерполяции. Однако при разработке конкретных участков в рекомендациях для точного земледелия должны учитываться динамический характер почвенного азота и эффективность его поглощения сельскохозяйственными культурами в разных ландшафтах. Вместе с тем рекомендации, основанные на показателях в течение вегетации, не могут служить руководством для принятия решений перед посевом (посадкой).

Кроме того, интегративный сайт-специфичный подход к управлению азотом связывает модели с географической привязкой для поддержки принятия решений с динамическими биогеохимическими моделями, которые моделируют результаты на основе соответствующих факторов урожая, почвы, погоды и управления предприятием. Модели, имитирующие состояние N (например, БД по величинам АМС), затем могут быть проверены с помощью полевых

измерений, собранных в течение вегетационного периода.

Таким образом, технологии точного земледелия совместимы в рамках адаптивной системы управления N, в которой для повышения точности модели используются конкретные эмпирические данные по конкретным участкам уровня поля или контура. В конечном счете данные из этих различных источников могут быть объединены с помощью машинного обучения или других методов для предоставления необходимых оценок и автоматизированных рекомендаций с использованием технологий Индустрии 4.0.

Данные зондирования сельскохозяйственных культур и данные управления с географической привязкой могут быть использованы для расчета и отображения величин ЭИА в пространстве и времени (рис. 5).

Точное земледелие — подход к управлению хозяйственными, который направлен на определение методов, оптимизирующих использование ресурсов, в данном случае азотных удобрений. Точное земледелие не сосредоточено исключительно на управлении азотом, но улучшение эффективности его использования также включено, как и управление экологическими рисками. Управление на уровне конкретного участка поля может улучшить ЭИА, увеличить прибыль и/или минимизировать риски непроизводительных потерь.

Чем лучше растения используют азот из удобрения и чем активнее усваивается поглощенное количество, тем выше его агрохимическая эффективность или окупаемость азотного удобрения увеличением урожая основного продукта. Можно привести пример использования технологий точного земледелия на северо-западе РФ [13]. При этом удобрения и другие ресурсы были аналогичны высокоинтенсивному земледелию, однако азотные (аммиачная селитра) и калийные (хлористый калий) удобрения вносились дифференцированно, с учетом 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). Удобрения вносились с помощью разбрасывателя твердых удобрений Amazon ZA-M 1500 с бортовым



Рис. 5. Основные модули программы Agro-Net NG [12]

Figure 5. Agro-Net NG Core Modules

компьютером и GPS. Также были вариации, основанные на усовершенствованных технологиях точного земледелия, которые применялись благодаря более информативному и дифференцированному внесению азота, на оценке оптических свойств листьев пшеницы.

Окупаемость 1 кг питательных веществ удобрения для повышения урожайности зависит от доз, сроков их внесения и вида культуры. Дифференциальное внесение удобрений увеличивает окупаемость 1 кг азотного удобрения при увеличении урожайности зерна у обоих изучаемых сортов (с 27,7% до 210% у сорта Эстер и с 43,5% до 250% у сорта Красноуфимский-100).

Заключение

Повышение эффективности использования азота (ЭИА) необходимо для сокращения потерь азота и производственных затрат. Четыре условия (правильное количество, правильное время, правильный метод и правильный источник) следует рассматривать как первый шаг к повышению эффективности использования азота. Для достижения высокой эффективности необходимо внедрить несколько других передовых методов управления производством и защитой окружающей среды, в частности, лучшие практики устойчивого земледелия (ЛПУЗ). Становятся доступны новые технологии, такие как новые источники азота, использование микробов, наноудобрений и переработанных питательных веществ из различных отходов. Фундаментальным аспектом является разработка более совершенных приемов для внесения удобрений и стратегий управления, позволяющих синхронизировать доступность азота в почве

со спросом на него у сельскохозяйственных культур и таким образом максимизировать эффективность использования азота.

Необходимо учитывать физиологические процессы растений, включая разнообразие механизмов усвоения минеральных веществ, их перемещение и метаболизм, для выведения сортов сельскохозяйственных культур, которые в конечном итоге будут более эффективными. Подобная информация может быть реально использована в практике только с применением компьютерных систем. Технологии, направленные на создание электронных двойников агрономических и агрохимических процессов, дают возможность уже в настоящее время использовать концепцию Индустрии 4.0. В будущем еще большее развитие технологий дистанционного управления агроэкосистемами и искусственного интеллекта позволит сделать сельское хозяйство, в частности, применение азотных удобрений как основного фактора получения урожая, экономически и экологически оптимальным.

Список источников [References]

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. № 4(815). С. 108–116 [Arno O.B., Arabskii A.K., Bashkin V.N. Innovative development at Gazprom Dobycha Yamburg LLC. Similarities and differences in potential catastrophe prevention methods // Gas Industry of Russia. 2021;(4):108–116. (In Russ.)]

2. Башкин В.Н. Экологические риски применения азотных удобрений // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19. № 2. С. 40–53.
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-2-40-53> [Bashkin V.N. Ecological risks of using nitrogen fertilizers // Issues of Risk Analysis. 2022;19(2):40–53. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-2-40-53>]
3. Sutton MA, Howard CM, Erisman JW, Billen G, Bleeker A, Grennfelt P, et al., editors. The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge: Cambridge University Press; 2011. The European Nitrogen Assessment (Sutton M. A., Ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2011. 664 p.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511976988>
4. Башкин В.Н. Повышение эффективности использования азота: проблемы и пути решения. Сообщ. 1. Агрогеохимические подходы // Агрохимия. 2022. № 7. С. 82–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188122070031> [Bashkin V.N. Improving the efficiency of nitrogen use: problems and solutions. Part 1. Agrogeochemical approaches // Agrochemistry. 2022;(7):82–96. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0002188122070031>]
5. Башкин В.Н. Увеличение эффективности использования азота: оценка азотминерализующей способности почв // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 3. С. 45–50.
<https://doi.org/10.31857/S2500262722030097> [Bashkin V.N. Increasing the efficiency of nitrogen use: assessment of the nitrogen mineralizing capacity of soils // Russian Agricultural Science. 2022;(3):45–50. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2500262722030097>]
6. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Козлова Н.П., Шалавина Е.В. Азот и цели устойчивого развития сельского хозяйства // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 2(111). С. 3–13.
<https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-2111-3-13> [Bryukhanov A. Yu., Vasiliev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V. Nitrogen and sustainable development goals for agriculture // AgroEcoEngineering. 2022;(2):3–13. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-2111-3-13>]
7. Башкин В.Н. Оценка величин азотминерализующей способности в различных почвенно-экологических регионах // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2022. № 3(171). С. 117–122 [Bashkin V.N. Estimation of nitrogen mineralizing capacity in various soil-ecological regions // Use and Protection of Natural Resources in Russia. 2022;(3):117–122. (In Russ.)]
8. Javed T, I I, Singhal RK, Shabbir R, Shah AN, Kumar P, Jinger D, Dharmappa PM, Shad MA, Saha D, Anuragi H, Adamski R and Siuta D (2022) Recent Advances in Agronomic and Physio-Molecular Approaches for Improving Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. Front. Plant Sci. 13:877544.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.877544>
9. Watson, L., & Rahmani, T. (2022). A glimpse of the Nitrogen-Fixing Wheat possibility. Journal of Natural Sciences and Mathematics Research, 8(1), 1–9.
<https://doi.org/10.21580/jnsmr.2022.8.1.11766>
10. Yusminah Hala. The effect of nitrogen-fixing bacteria towards upland rice plant growth and nitrogen content // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2020. Vol. 484. 012086. IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/484/1/012086>
11. Martínez-Dalmau J., Berbel J., Ordóñez-Fernández R. Nitrogen fertilization. A review of the risks associated with the inefficiency of its use and policy responses. Sustainability 2021;13(10):5625.
<https://doi.org/10.3390/su13105625>
12. Научно-обоснованный прогноз развития точного земледелия в России / Е.В. Рудой, М.С. Петухова, С.В. Рюмкин [и др.]. Новосибирск: Золотой колос, 2021. 138 с. ISBN 978-5-94477-295-4. [A scientifically based forecast of the development of precision agriculture in Russia / E. V. Rudoy, M. S. Petukhova, S. V. Ryumkin [et al.]; Novosibirsk: Golden Ear, 2021. 138 p. ISBN 978-5-94477-295-4. (In Russ.)]
13. 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>

Сведения об авторе

Башкин Владимир Николаевич: доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Количество публикаций: более 400

Область научных интересов: геоэкологические риски, газовая промышленность, биогеохимия

Researcher ID: J-4621-2018
Scopus Author ID: 7005340339
ORCID: 0000-0001-5656-3011

Контактная информация:
Адрес: 142292, Московская обл., г. Пушкино,
ул. Институтская, д. 2-2, ИФХБПП РАН
vladimrbashkin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 16.05.2024
Одобрена после рецензирования: 07.06.2024
Принята к публикации: 28.06.2024
Дата публикации: 30.08.2024

The article was submitted: 16.05.2024
Approved after reviewing: 07.06.2024
Accepted for publication: 28.06.2024
Date of publication: 30.08.2024