

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРБАМИДА[§]

© 2024 г. А. А. Завалин^{1,*}, Л. А. Свиридова¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
им. Д.Н. Прянишникова

127434 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

*E-mail: zavalin.52@mail.ru

Использование пролонгированных азотных удобрений позволяет сократить дозы на 20–30% и расходы на их применение. Применение пролонгированных форм азотных удобрений улучшает качество растительной продукции, снижая в ней содержание нитратов. Используются различные модификации карбамида: удобрения пролонгированного действия за счет слабой растворимости гранул, капсулированные удобрения, удобрения, модифицированные ингибиторами уреазы и нитрификации, удобрения с контролируемым высвобождением элементов питания, биомодифицированные удобрения, удобрения на матрице. Применение таких удобрений обеспечивает повышение коэффициента использования растениями азота удобрения, снижает его газообразные потери, увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур. Кроме того, использование модифицированных форм карбамида снижает негативное воздействие на окружающую среду. Выделение газообразных форм азота при применении капсулированного карбамида с ингибиторами уреазы и нитрификации проходит в 2 раза медленнее. Эффективность использования модифицированного ингибиторами карбамида, по данным вегетационных и полевых опытов на яровой пшенице, выражалась в прибавке урожайности зерна на 9–12%, коэффициент использования азота удобрений (КИ) был больше на 16–27%. Прибавка урожайности зерна озимой пшеницы может составлять 5–21%, коэффициент использования азота (КИ) может быть на 5–18% больше. Урожайность кукурузы может быть больше на 6–17%, КИ азота растением – увеличиться на 17–20%. Прибавка урожайности риса при использовании карбамида с ингибиторами нитрификации или уреазы варьирует от 3 до 23, листового салата – 11, картофеля – 10–11%.

Ключевые слова: карбамид, модифицированный карбамид, урожайность и качество продукции, коэффициент использования азота (КИ), потери азота удобрений.

DOI: 10.31857/S0002188124110017, **EDN:** AINVTU

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важных задач современного земледелия заключается в рациональном природопользовании, улучшении экологической обстановки и обеспечении продовольственной безопасности. В этой связи актуальным является разработка и применение нового поколения удобрений, позволяющих повысить эффективность их использования и уменьшить нагрузку на биосферу [1]. По данным международной ассоциации производителей минеральных удобрений (International Fertilizer Association (IFA)), прогнозируют ежегодный рост спроса на минеральные удобрения. Ведущая роль на мировом рынке агрохимикатов принадлежит азотным удобрениям. К 2027 финансовому году потребление N-удобрений достигнет 115 млн т, что на 9.4 млн т, или на 9%, больше, чем в 2022 г.

Потребление P-удобрений достигнет 50.2 млн т, что на 6 млн т, или на 14%, больше, чем в 2022 г., потребление калийных удобрений – 40.6 млн т, что на 5.1 млн т, или на 14%, больше, чем в 2022 г. [2, 3].

По данным [4], производство продовольствия в мире без использования минеральных удобрений составило бы только половину от нынешнего объема. В Российской Федерации в 2023 г. производство всех видов минеральных удобрений достигло 26 млн т действующего вещества, это на 10.3% больше, чем в предыдущем году, при этом выпуск N-удобрений составил 12.5 млн т, или на 5.2%, больше 2022 г., в физическом весе это достигло 28 млн т, что больше предыдущего года на 6% [5]. Несмотря на высокий объем производства азотных удобрений проблема баланса азота в земледелии остается не решенной, поскольку потери азота из удобрений вследствие денитрификации, улетучивания аммиака при поверхностном внесении амидных удобрений

[§] Работа выполнена за счет гранта РНФ № 24-16-00068.

без заделки, вымывания нитратной формы азота из корнеобитаемого слоя почвы вследствие нитрификации варьируют в широком интервале и могут достигать 50% и более от внесенной дозы, в свою очередь коэффициент использования растениями азота минеральных удобрений (**КИ**), как правило, не превышает 50–60% [6]. В этой связи повышение эффективности использования растениями применяемых азотных удобрений – проблема, которая существовала десятилетиями и остается актуальной в настоящее время [7–9]. В нашей стране в ассортименте минеральных удобрений основную долю занимает аммиачная селитра (39%), 2-е место принадлежит карбамиду (5%) [10].

Цель работы – анализ результатов полевых, микрополевых и вегетационных опытов по повышению использования растениями азота карбамида (мочевины).

Исходной базой работы послужили результаты полевых, микрополевых и вегетационных опытов по оценке эффективности применения карбамида, опубликованные в отечественных и зарубежных источниках. В процессе исследования использовали метод сравнения и экспертную оценку.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРБАМИДА

Повышение эффективности использования карбамида может быть решено различными путями, направленными на сокращение возможных непроизводительных потерь азота и воздействия на окружающую среду, что наиболее актуально при применении азотных удобрений, в первую очередь карбамида, азот которого помимо иммобилизации подвержен денитрификации, улетучиванию NH_3 и вымыванию азота в форме NO_3^- [11].

Карбамид (46% N) в настоящее время является основным видом азотных удобрений, используемых во всем мире, на его долю приходится 73.4% всех применений азотных удобрений в мире [12–14]. При применении в качестве удобрения азот карбамида становится доступным для растений только благодаря активности фермента уреазы [15]. Уреаза – широко распространенный экзофермент, выделяемый многими бактериями и растениями, который катализирует гидролиз мочевины с образованием аммиака и двуокиси углерода. Аммиак, скорее всего, улетучится в атмосферу, если он не вступит в реакцию с водой с образованием аммония (NH_4^+). Аммоний является доступным для растений источником азота, аммиак – нет. Далее происходит окисление аммиака до нитрита (промежуточная реакция) и в конце – до нитрата. В ходе этих процессов потери внесенного азота могут составлять в зависимости от почвенных условий и климата до 20–60% в виде NH_3 , 2–4% – в форме N_2O , 20–40% – в виде NO и до 60% – в виде

NO_3 . Ионы NH_4^+ и NO_3^- являются основными формами поглощения растениями азота и основными показателями для оценки способности почвы обеспечивать растения азотом [16, 17].

В опытах с применением меченых атомов ^{15}N было показано, что зерновые культуры усваивают всего 30% азота минеральных удобрений, до 50% внесенного азота закрепляется в почве и $\approx 30\%$ теряется в форме аммиака. Внесение карбамида приводит к подщелачиванию верхнего слоя почвы в результате накопления аммония, увлажнение удобренной почвы подкисляет ее в результате накопления нитратов в процессе нитрификации азота карбамида [18–20].

При поверхностном использовании обычного карбамида основные газообразные потери азота происходят в первую неделю после внесения, затем выделение аммиака значительно снижается, т.к. большая часть азота переходит в нитратную форму в результате нитрификации. Через 2–3 нед выделение NH_3 из почвы прекращается совсем. Максимальные потери азота удобрений в форме NH_3 наблюдают при поверхностном внесении карбамида и на глубину до 5 см, а при глубокой заделке на глубину до 20 см потери газообразного азота практически исключаются [18, 19]. Это происходит в результате снижения интенсивности микробиологических процессов и поглощения газов большим слоем почвы. Потери NH_3 из карбамида при 75% полной влагоемкости (**ПВ**) снижаются в 1.5 раза. При pH 8.0 почвенной среды потери азота в форме NH_3 достигают 60%. При температуре воздуха 7°C потери аммиака из карбамида бывают <5%, при 28–32°C выделение NH_3 из почвы увеличивается [21, 22].

По состоянию на сегодняшний день, практически под все сельскохозяйственные культуры практикуют дробное внесение минеральных удобрений (основное, пред- и припосевное, подкормки). Такая практика способствует равномерному поступлению питательных веществ на протяжении всего онтогенеза и снижает антропогенную нагрузку на окружающую среду, однако возрастают затраты на применение удобрений. Неиспользованный растениями азот может оказывать негативное воздействие на окружающую среду. В частности, избыток азота, вносимого в почву, выбрасывается в атмосферу в виде парниковых газов – закиси азота (N_2O) и аммиака (NH_3), вызывая загрязнение воздуха, а потери в результате выщелачивания нитратов приводят к загрязнению подземных вод и эвтрофикации [16, 23, 24].

Использование пролонгированных азотных удобрений позволяет сократить дозы на 20–30% и расходы на их применение. Внесение пролонгированных форм азотных удобрений улучшает качество растительной продукции, снижая в ней содержание нитратов [25].

Предложены различные “добавки” для совместного применения с карбамидом, чтобы уменьшить потери азота. Многие из таких продуктов предназначены для ингибирования одного или нескольких биохимических процессов в почве. Различные рецептуры и комбинация этих продуктов нацелены на уменьшение выщелачивания NO_3^- и потери NH_3 при улетучивании [26].

Пути (приемы) повышения эффективности N-удобрений можно разделить по механизму их действия: удобрения пролонгированного действия за счет слабой растворимости (мочевинно-формальдегидное удобрение, изобутилендимочевина, кротонилдендимочевина) [27, 28], капсулированные удобрения, содержащие оболочку, которая покрывает гранулу удобрения и является барьером при взаимодействии с почвенным раствором [29–31], удобрения, модифицированные ингибиторами уреазы и нитрификации [17, 32, 33], удобрения с контролируемым высвобождением элементов питания [34, 35], биомодифицированные удобрения (содержат “биокапсулу” — бактериальный препарат в виде сухого порошка, нанесенный на гранулы минерального удобрения) [36–38], удобрения на матрице, состоящей из коры древесных растений, сапропеля, лигнина, струвита, монтмориллонита и др. (матрица постепенно разлагается, высвобождая элементы питания удобрения) [39–41].

Удобрения пролонгированного действия за счет слабой растворимости. Эти удобрения могут оказывать положительное влияние (последствие) в последующие годы. В карбамидно-формальдегидном удобрении (**КФУ**) осуществляется оптимизированное соотношение “быстрорастворимого” и “медленнорастворимого” азота для различных групп сельскохозяйственных культур по продолжительности их роста (с коротким, средним и продолжительным периодом вегетации). Пролонгированное КФУ наряду с другими основными промышленными азотными удобрениями (аммиачной селитрой и карбамидом) оказывает положительное воздействие на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов, и поэтому деградация углеводов в загрязненной почве значительно больше [28]. Скорость растворения гранул пролонгированного удобрения (**КМУ**) с использованием каустического магнезита (MgO) меньше в 10–50 раз по сравнению с карбамидом. Прочность гранул КМУ больше в 2–3 раза, что существенно уменьшает пылеобразование и слеживаемость удобрения [42]. Показано, что КФУ положительно влияло на прирост диаметра стволика семян ели европейской, сосны обыкновенной, лиственницы сибирской [43].

Капсулированные удобрения. Это медленнодействующие удобрения, имеют ряд преимуществ перед обычными формами. При их использовании уменьшаются потери питательных элементов в период

между внесением и усвоением их растениями, повышается коэффициент их использования растениями, улучшается качество продукции, снижаются трудозатраты. Гранулированные удобрения содержат оболочки, которые состоят из минеральных солей (фосфатов, силикатов и др.), элементарной серы, соединений кальция и магния, органических полимеров (полиуретана, полиэтилена, фенолформальдегидных смол, полисахаридов и др.). Капсулирование ограничивает контакт удобрения с почвой и микроорганизмами, уменьшая потери азота за счет биологических и химических процессов и вымывания, способствуют снижению эмиссии N_2O на 31–35% и потери аммиака на 15–78%, тем самым усиливая потребление азота растениями на 12–70% [44–47].

Удобрения с покрытием гранул обеспечивают прибавку урожайности сельскохозяйственных культур на уровне 8–35% [48, 49]. Например, урожайность картофеля на 20.7% была больше при применении капсулированного карбамида. В клубнях содержание нитратного азота снижалось на 27.5%, содержание крахмала увеличивалось на 10.8% [50]. Капсулированный карбамид с покрытием гранул монокальцийфосфатом обеспечивает высокий урожай зерна яровой пшеницы и улучшает показатели качества семенного материала, позволяет более равномерно обеспечивать растения пшеницы азотом и повысить коэффициент его использования растениями из карбамида [31]. Капсулирование гранул карбамида силикатом кальция увеличивает механическую прочность гранул на 34.6 г/гранулу, уменьшает их растворимость в 3–4 раза [30].

Получены пролонгированные азотно-магниевые удобрения путем “цементирования” промышленных быстрорастворимых азотных удобрений (карбамида, аммиачной селитры) гидроксолями магния (“цементом Сореля”). Прочность гранул азотно-магниевых удобрений значительно больше, а скорость растворения меньше в 10–50 раз. Удобрения существенно увеличивают урожай зерна яровой пшеницы, ячменя и зеленой массы суданской травы на 5–49% [27].

Удобрения, модифицированные ингибиторами уреазы и нитрификации. Использование удобрений, содержащих ингибиторы, снижает потери азота в результате ингибирования уреазой гидролиза мочевины до NH_3 и CO_2 , а ингибиторы нитрификации подавляют активность нитрифицирующих бактерий и снижают концентрацию нитратного азота в почве [51]. В качестве ингибиторов уреазы используют различные соединения: N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (**NBPT**), N-(n-propyl) thiophosphoric triamide (**NPPT**), N-phenylphosphoric triamides (**2-NPT**), Hydroquinone (**HQ**), Phenyl phosphorodiamidate (**PPD/PPDA**), Thiosulphate ammonium (**TA**) замещенные фосфороди-и-триамидаты (**RO-PO(NH)**), алкилбензилдиметиламмония хлорид (**ABDMAC**),

дидецилдиметиламмония хлорид (**DDDMAC**), гу-мат натрия, парааминофенол (**РАР**), другие органические вещества. Для ингибирования нитрификации используют следующие вещества: dicyandiamide (**DCD**), 3,4-dimethylpyrazole phosphate (**DMPP**), 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine (Nitrpyrin), 4,6-dichloro-2-trichloromethylpyridine (**DCTCMP**), Ammonium-thiosulphate (**ATS**), 1H-1,2,4-triazole, 3-methylpyrazole (**3-MP**), 2-amino-4-chloro-6-methyl-pyrimidine (**AM**). В дополнение могут добавлять также сульфат меди (II) – фунгицид или борную кислоту – активатор роста растений [52–56].

Введение ингибитора уреазы в традиционное удобрение карбамид обеспечивает выровненный доступ минеральных форм азота для растений в почве в течение вегетации, позволяет сократить кратность применения, что исключает проведение дополнительных подкормок. Процесс поглощения азота карбамида в виде молекул становится пролонгированным, при припосевном внесении карбамида снижается неблагоприятное действие избытка выделяющегося аммиака на проростки, особенно при внесении высоких доз удобрений [17, 57, 58]. Действие ингибитора нитрификации **DMPP** (3,4-диметилпиразол фосфат) может длиться до 12 нед после внесения удобрения в зависимости от почвенных и климатических условий [17]. Использование ингибитора уреазы **NBPT** (N-(n-бутил) тиофосфотриамида) с карбамидом сокращает суммарные потери аммонийного азота, замедляет скорость аммонификации, а первые 7 сут совсем блокирует процесс [33]. При использовании капсулированного карбамида, покрытого фосфатным порошком, выделение газообразных форм азота (>80% от внесенного) продолжается до 28 сут, а при добавлении ингибиторов уреазы и нитрификации – 56 сут. Активность уреазы почвы снижается после добавления в состав азотных удобрений ингибиторов уреазы и нитрификации (гидрохинона и дициандиамида (**HQ** и **DCD**)). Пиковое улетучивание NH_3 задерживается, а суммарное его улетучивание снижается. Полевые эксперименты с озимой пшеницей показали, что добавление гидрохинона и дициандиамида ингибирует превращение почвенного NH_4^+ в NO_3^- на ранней стадии и снижает риск вымывания NO_3^- [59, 60].

Использование карбамида с ингибитором уреазы позволяет снизить газообразные потери аммиака с 19–22% от внесенной дозы азота до 5–6% [45, 47, 61, 62]. Снижение эмиссии закиси азота при применении азотных удобрений, модифицированных ингибиторами нитрификации, может составлять 11–96% [46, 63–65]. Применение ингибиторов нитрификации увеличивает вынос азота растениями на 11–44% и обеспечивает прибавку урожайности овощных культур 6–48% относительно обычной формы азотного удобрения [45, 61, 62, 66–68]. Применение капсулированного и капсулированного

с ингибитором уреазы карбамида снижает в листьях салата содержание нитратного азота на 120 и 138% по сравнению с обычным карбамидом [69].

Эффективность использования модифицированного ингибиторами карбамида, по данным вегетационных и полевых опытов на яровой пшенице, выражена в прибавке урожайности зерна на 9–12%, коэффициент использования азота удобрений (КИ азота) на 16–27% был больше [29, 70]. Прибавка урожайности зерна озимой пшеницы может составлять 5–21%, КИ азота при этом на 5–18% больше [57, 71]. Урожайность кукурузы была больше на 6–17%, КИ азота растением – больше на 17–20% [17, 32]. Прибавка урожайности риса при использовании карбамида с ингибиторами нитрификации или уреазы варьировала от 3 до 23% [17, 33, 71], листового салата – 11% [69], картофеля – 10–11% [50, 68]. По данным [68], ранние и среднеранние сорта картофеля с вегетацией 85–95 сут практически не реагировали на применение карбамида с ингибитором уреазы. Однако увеличивалась урожайность среднеспелых и среднепоздних сортов с периодом активной вегетации 105–115 сут на низкоплодородной почве на 4.1–4.4 т/га (на 9.6–11.1%), на высокоплодородной почве – на 2.5–2.8 т/га (на 5.5–6.5%) по сравнению с традиционной формой удобрения.

Применение биохимических ингибиторов признано целесообразной мерой для повышения эффективности использования растениями азота удобрений, уменьшения загрязнения окружающей среды соединениями азота, достижения благоприятной его циркуляции в экосистемах, снижения нитратного загрязнения продукции. Эти удобрения считаются самыми эффективными из доступных для фермеров на сегодняшний день [17, 60, 72].

Удобрения с контролируемым высвобождением элементов питания. В конце XX века в литературе появились результаты оценки эффективности применения 2-х групп удобрений пролонгированного действия: с замедленным высвобождением азота и с контролируемым высвобождением. Первые относятся к удобрениям, в которых скорость превращения питательных веществ в доступную форму находится под влиянием естественных неконтролируемых факторов [11]. В удобрениях с замедленным высвобождением (**SRF**) более длительный период доступности питательных веществ достигается за счет гидролиза, биodeградации или ограничения растворимости, которые не доступны в традиционных формах азотных удобрений. Скорость высвобождения нельзя контролировать, поскольку она зависит от почвенных и климатических факторов. В удобрениях с контролируемым высвобождением (**CRF**) питательные вещества становятся доступными в заявленном количестве в заявленное время при заданной концентрации

питательных веществ в удобрении. Высвобождение зависит от материала покрытия: органической смолы, полимерного покрытия [73].

Использование удобрений с контролируемым высвобождением имеет несколько преимуществ: сокращается потеря питательных веществ, уменьшается вероятность токсического воздействия на растения, сокращается количество внесений и, следовательно, снижаются затраты на использование удобрений. В то же время следует учитывать недостатки этих удобрений: более высокую стоимость, специфические эффекты покрытий из различных типов гранул. Применение капсулированных удобрений с контролируемым высвобождением, где в качестве покрытия используют синтетические, трудно разлагаемые полимеры, могут приводить к накоплению частиц пластика в почве. Интенсивность накопления может достигать 50 кг/га/год [25]. Перспективы использования удобрений контролируемого действия основаны на экономическом анализе и разработке новых химических рецептур, которые помогут минимизировать производственные затраты и негативное воздействие на окружающую среду.

Применение удобрений контролируемого действия под сельскохозяйственные культуры — пшеницу, перец, томат, лук, клубнику, дыню, рис, киви, бананы, цитрусовые — показали их высокую агрохимическую эффективность [74].

Продолжительность действия удобрений CRF с покрытием из синтетических полимеров достигает 17–18 мес. Использование азотных, комплексных и калийных CRF-удобрений снижает потери N, CaO, MgO, водорастворимого гумуса из удобрений и почвы на 21–35%, уменьшает накопление в растениях вредных веществ (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) и тем самым ограничивает загрязнение водных источников [35, 41, 59].

Испытывают супергидрофобные удобрения с контролируемым высвобождением, покрытые биополимерами с кремнийорганическими, нанокремнеземными модификациями и биополиуретаном на основе сжатой пшеничной соломы [75].

Биоминеральные удобрения. Комплексное применение азотных удобрений и биопрепаратов для инокуляции семян небобовых культур повышает коэффициент использования (КИ) растениями азота удобрений на 5–10% [21]. Применение биоминеральных удобрений стимулирует всхожесть семян, корнеобразование и регулирует микробоценоз корневой системы, тем самым увеличивая их потенциальную продуктивность. По сравнению с традиционной формой удобрений установлена большая эффективность биоминеральных удобрений на озимой пшенице [76].

Удобрения на матрице. Биокомпозитные удобрения получены нанесением карбамида на пористые подложки из коры и луба березы. Скорость адсорбции

карбамида пористыми подложками из водного раствора больше, чем скорость десорбции из биокомпозитного удобрения в почвенный раствор. Биокомпозитные удобрения на основе карбамида проявляют повышенные ростостимулирующие свойства на растениях кресс-салата и обладают пролонгированным действием [39]. Разрабатывают покрытия на основе суперабсорбентных и биоразлагаемых материалов, которые синтезируют из доступного промышленного сырья и используют в составе медленнодействующих удобрений [77, 75]. Удобрения на матрице содержат >40% сорбента и характеризуются низкой концентрацией в них действующих веществ [29].

Использование новых модифицированных форм азотных удобрений, в том числе и карбамида, неразрывно связано с экономической целесообразностью. Цена на удобрения с ингибиторами уреазы/нитрификации в 1.3–1.6 раза больше цены на стандартные удобрения, на удобрения с контролируемым высвобождением — в 4–6 раз и на капсулированные — в 8–12 раз [25].

По данным [78], окупаемость затрат при применении карбамида (N90) с ингибитором почти в 2 раза больше, чем применение обычного карбамида с дозой азота в 1.5 раза больше (N135). Пролонгированное действие карбамида позволяет повысить эффективность удобрений без увеличения дозы азота. Затраты на капсулированный карбамид и с ингибитором уреазы (гидрохиноном) почти одинаковые. Урожайность при применении удобрения с ингибитором больше, чем с капсулированным карбамидом, поэтому стоимость полученной продукции с 1 га была на 2 млн руб. больше, что свидетельствовало об интенсивных методах улучшения хозяйствования. Окупаемость единицы внесенного азота удобрения с ингибитором нитрификации урожаем зерна риса была больше на 20.3 кг зерна/кг N по сравнению с основным внесением азота в дозе N120 [79]. Биомодификация минеральных удобрений агрономически полезными микроорганизмами — один из способов повышения эффективности их использования. Окупаемость биоминеральных удобрений повышается за счет прибавки урожая на 50–60%. Соотношение дополнительной прибыли от применения биомодифицированных удобрений и дополнительных затрат на биомодификацию удобрения составляет 7 : 1 [38].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ отечественных и зарубежных материалов исследований показал, что используются различные модификации карбамида: удобрения пролонгированного действия за счет слабой растворимости, капсулированные удобрения, удобрения, модифицированные ингибиторами уреазы и нитрификации, удобрения с контролируемым

высвобождением элементов питания, биомодифицированные удобрения, удобрения на матрице. Применение таких удобрений обеспечивает повышение коэффициента использования растениями азота удобрения, снижает его газообразные потери, увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур. Практическое использование таких форм сдерживается более высокой ценой, однако для получения экономически значимого урожая требуется внесение более низких доз этих удобрений. Кроме того, использование модифицированных форм карбамида снижает негативное воздействие на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Calabi-Floody M., Medina J., Rumpel C., Condon L.M., Hernandez M., Dumont M., Mora M.L. Smart fertilizers as a strategy for sustainable agriculture. *Advances in agronomy*. N.Y.: Academic Press, 2018. 289 p.
2. IFA Market Intelligence Service. World Outlook for Fertilizer Demand, Nitrogen, Phosphates and Potash from 2021 to 2022. Public Summary // IFA Strategic Forum. 2021. P. 1–6.
3. Cross L., Gruere A. Public summary – world outlook for fertilizer demand, nitrogen, phosphates and potash from 2022 to 2023 // IFA Strategic Forum. Washington, 2022. P. 1–13.
4. Food Security and COVID-19. World Bank Brief, 2020.
5. <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-mineralnykh-udobreniy-2023-i-perspektivy-na-2024/?ysclid=lvdfjb8t3o967458074>. (Дата обращения: 24.04.2024).
6. Андреев Б.М., Арефьев Д.Г., Баранов В.Ю., Бедняков В.А. Изотопы: свойства, получение, применение. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 728 с.
7. Малявин А.С., Миносьянц С.В., Аксентчик К.В., Лапушкин В.М. Производство минеральных удобрений // Энциклопедия технологий 2.0: Химический комплекс. М., СПб.: Центр экол. пром. политики, 2022. С. 11–88.
8. Dobermann A. Nitrogen use efficiency – state of the art // IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers. International Fertilizer Industry Association. Frankfurt, 2005. P. 63–65.
9. Grant C. Policy aspects related to the use of enhanced-efficiency fertilizers: Viewpoint of the scientific community // IFA Inter. Workshop Enhanced-Efficient Fertil. Frankfurt, 2005. P. 148–155.
10. Жданов В.Ю. Анализ внутреннего рынка минеральных удобрений в России // Совр. технол. управл.-я. 2023. № 4(104). 10412.
11. Shaviv A. Advances in controlled-release fertilizers // *Adv. Agron.* 2001. V. 71. P. 2–51.
12. Бочаров С.С., Инаков Т.К., Холбоев Ю.Х. Ингибирование уреазы – фермента разложения мочевины // Сб. научн. докл. 21-й научн.-практ. конф. “Актуальные вопросы современной науки”. Мин. воды, 2015. С. 163–167.
13. Zheng W., Liu Z., Zhang M., Shi Y., Zhu Q., Sun Y., Zhou H., Li C., Yang Y., Geng J. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat–maize system // *Field Crops Res.* 2017. V. 205. P. 106–115.
14. Tilman D., Balzer C., Hill J., Befort B.L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. № 108(50). P. 20260–20264.
15. Witte C.P., Tiller S.A., Taylor M.A., Davies H.V. Leaf urea metabolism in potato: urease activity profile and patterns of recovery and distribution of ^{15}N after foliar urea application in wild-type and urease-antisense transgenics // *Plant Physiol.* 2002. № 128. P. 1129–1136.
16. Zhang W., Liang Z., He X., Wang X., Shi X., Zou C., Chen X. The effects of controlled release urea on maize productivity and reactive nitrogen losses: A meta-analysis // *Environ. Pollut.* 2019. № 246. P. 559–565.
17. Маннхайм Т., Бергер Н. Удобрение культур стабилизированными азотными удобрениями // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2015. № 3(5). С. 28–30.
18. Макаров В.И. Влияние доз карбамида и норм орошения на эмиссию аммиака из агродерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // *Вестн. Алтай. ГАУ.* 2017. № 6(152). С. 54–60.
19. Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: СО РАСХН, 2013. 790 с.
20. Кореньков Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Агроконсалт, 1999. 295 с.
21. Завалин А.А. Биологический и минеральный азот земледелия России. М.: ВНИИА, 2022. 256 с.
22. Завалин А.А., Благовещенская Г.Г., Чернова Л.С., Шмырева Н.Я. Управление азотным питанием растений в почве // *Агрохим. вестн.* 2012. № 4. С. 38–40.
23. Chen Z., Wang Q., Ma J., Zou P., Jiang L. Impact of controlled-release urea on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a single rice cropping system // *Sci. Rep.* 2020. № 10(1). 10432. DOI: 10.1038/s41598-020-67110-6
24. Qi Z., Wang M., Dong Y., He M., Dai X. Effect of coated urease/nitrification inhibitor synergistic urea on maize growth and nitrogen use efficiency // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2022. № 22(4). P. 5207–5216.
25. Trenkel M.E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010. 163 p.

26. *Шаляпин В.В., Али А.К.А.* Теория и практика применения ингибированного карбамида в условиях западного Предкавказья // Сб. ст. по мат-лам Всерос. научн.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. ученых-агрохимиков Коренькова Д.А. и Тонконоженко Е.В. "Энтузиасты аграрной науки" / Отв. за выпуск Шеуджен А.Х. Краснодар: КГАУ им. И.Т. Трубилина, 2020. С. 262–268.
27. *Хузиахметов Р.Х.* Перспективные направления производства пролонгированных азотных удобрений-дефендеров // II Всерос. научн.-практ. конф. с международ. участием, посвящ. 90-летию СГЭУ / Под ред. С.В. Афанасьева, Т.С. Кобзарь, С.В. Сердюковой. Самара, 2021. С. 259–269.
28. *Хузиахметов Р.Х., Толстогузова Е. В., Низамов А.С.* Инновационная технология пролонгированных карбамидоформальдегидных удобрений и оценка их агрохимической и биостимулирующей эффективности // 2-я Всерос. научн.-практ. конф. "Инновации и "зеленые" технологии". Тольятти, 2019. С. 209–215.
29. *Лапушкин В.М., Игалиев Ф.Г., Лапушкина А.А., Торшин С.П., Норов А.М., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Соколов В.В., Кочетова И.М., Рыбин Е.А.* Оценка эффективности NPK-удобрения с замедленным высвобождением элементов питания // Агрохим. вестн. 2023. № 5. С. 22–27.
30. *Баранова Л.А.* Экологически чистое азотное удобрение // Агрохимия. 2013. № 3. С. 15–18.
31. *Волкова М.А., Лапушкин В.М., Лапушкина А.А.* Эффективность капсулированного карбамида при выращивании яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве // "Современные проблемы агрохимии, агропочвоведения и агроэкологии". Мат-лы 56-й Всерос. научн.-практ. конф. с международ. участием молод. ученых, специалистов, агрохимиков и экологов, посвящ. 150-летию со дня рожд. акад. К.К. Гедройца (ВНИИА) / Под ред. Завалина А.А. М.: ВНИИА, 2022. С. 39–44.
32. *Логинова И.В.* Оптимизация азотного питания кукурузы при использовании ингибитора нитрификации // Агрохим. вестн. 2012. № 1. С. 12–14.
33. *Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Хурум Х.Д., Перепелин М.А.* Азотный режим лугово-черноземной почвы и продуктивность рисового агроценоза при использовании карбамида, модифицированного ингибитором уреазы // Плодородие. 2023. № 1. С. 9–14. DOI: 10.25680/S19948603.2023.130.02
34. *Sow S., Dayal P., Ranjan S., Ghosh M., Kumar S.* Innovations in nutrient management: Improving efficiency and crop production. N.Delhi: Elite Publishing House, 2023. 145 p.
35. *Lawrencia D., Wong S.K., Low D.Y.S., Goh B.H., Goh J.K., Ruktanonchai U.R., Soottitantawat A., Lee L.H., Tang S.Y.* Controlled release fertilizers: A Review on coating materials and mechanism of release // Plants. 2021. № 10. P. 238. DOI: 10.3390/plants10020238
36. *Гаврилова А.Ю., Чернова Л.С., Завалин А.А.* Влияние сложных минеральных удобрений и биопрепарата БисолбиФит на урожайность и качество зерна ярового ячменя // Плодородие. 2019. № 4(109). С. 3–5. DOI: 10.25680/S19948603.2019.109.01.
37. *Никитин С.Н.* Оценка эффективности применения удобрений, биопрепаратов и диатомита в лесостепи Среднего Поволжья. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 316 с. DOI: 10.7868/S0002188118030134
38. *Чеботарь В.К., Завалин А.А., Ариткин А.Г.* Применение биомодифицированных минеральных удобрений. Ульяновск: Ульяновск. гос. ун-т, 2014. 142 с.
39. *Кузнецова С.А., Кузнецов Б.Н., Скурыдина Е.С., Максимов Н.Г., Калачева Г.С., Ульянова О.А., Скворцова Г.П.* Синтез и свойства биокomпозитных удобрений на основе мочевины и коры березы // Журн. Сибир. фед. ун-та. Химия. 2013. № 4. С. 380–393.
40. *Рудмин М.А., Рева И.В., Якич Т.Ю., Соктоев Б.Р., Буяков А.С., Табакаев Р.Б., Ибраева К.* Монтмориллонит как перспективный композитный минерал для создания современных удобрений // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 1. С. 14–22.
41. *Пироговская Г.* "Умные" удобрения // Наука и инновации. 2020. № 5. С. 28–32.
42. *Еремин Д.Н., Набиуллин Р.Ш., Хузиахметов Р.Х.* Технология пролонгированного карбамидо-магнезиального удобрения с использованием отходов производства огнеупоров // "Технологии переработки отходов с получением новой продукции". Мат-лы III Всерос. научн.-практ. конф. с международ. участием. Киров, 2021. С. 117–122.
43. *Сабиров А.М., Хузиахметов Р.Х., Усманов С.Б., Гафиятов Р.Х.* Оценка влияния пролонгированного карбамидо-формальдегидного удобрения на развитие сеянцев хвойных пород деревьев // "Экология родного края: проблемы и пути решения" 18-я Всерос. научн.-практ. конф. с международ. участием. Киров, 2023. С. 78–83.
44. *Shoji S., Delgado J., Mosier A., Miura Y.* Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2001. № 32. P. 1051–1070.
45. *Abalos D., Jeffery S., Sanz-Cobena A., Guardia G., Vallejo A.* Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency // Agric. Ecosyst. Environ. 2014. № 189. P. 136–144.
46. *Akiyama H., Yan X.Y., Yagi K.* Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural

- soils: meta-analysis // *Glob. Chang. Biol.* 2010. № 16. P. 1837–1846.
47. *Basten M., Brynildsen P., Belzen R.* Stabilized urea for enhanced nitrogen use efficiency // IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers. International Fertilizer Industry Association. Frankfurt, 2005. P. 73–78.
 48. *Gil-Ortiz R., Naranjo M.A., Ruiz-Navarro A., Caballero-Molada M., Atares S., García C., Vicente O.* New eco-friendly polymeric-coated urea fertilizers enhanced crop yield in wheat // *Agronomy*. 2020. № 10. P. 438.
 49. *Babar S.K., Hassani N.A., Rajpar I., Babar S.A., Shah Z., Khan I.* Comparison of conventional and encapsulated urea on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Euras. Proceed. Sci. Technol. Engin. Mathemat.* 2019. P. 181–187.
 50. *Козел Е.Г., Филисюк Г.Н.* Сравнительная оценка применения разных форм мочевины при возделывании картофеля // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 12. С. 119–122.
 51. *Feng J., Li F., Deng A., Feng X., Fang F., Zhang W.* Integrated assessment of the impact of enhanced-efficiency nitrogen fertilizer on N₂O emission and crop yield // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2016. № 231. P. 218–228.
 52. *Комиссаров И.Д., Козел Е.Г., Филисюк Г.Н., Перевозкина М.Г.* Способ получения медленнодействующих капсулированных удобрений: Пат. 2 732 446 С1, РФ // Б.И. 2020. Заявка: 2020101209. Бюл. № 26.
 53. *Комиссаров И.Д., Козел Е.Г., Филисюк Г.Н., Перевозкина М.Г., Барабаничкова Л.Н.* Способ получения капсулированных удобрений с ингибитором уреазы и соединением фунгицидного действия: Пат. (11) 2 786 642(13), РФ // Б.И. 2022. Заявка: 2021137048. Бюл. № 36
 54. *Филисюк Г.Н., Барабаничкова Л.Н., Ерофеева Ю.О., Перевозкина М.Г.* Способ получения капсулированных удобрений с ингибитором уреазы и соединением бора: Пат. 2 794 504 С1, РФ // Б.И. 2023. Заявка: 2022113813. Бюл. № 11.
 55. *Изосин В.А.* Композиция для гранулированного удобрения на основе карбамида: Пат. 2772944 RU (51), РФ // Б.И. 2021. Заявка: 2021123872. Бюл. № 15.
 56. *Комиссаров И.Д., Уступалова В.А., Козел Е.Г., Филисюк Г.Н.* Способ получения медленнодействующих капсулированных удобрений: Пат. RU (11) 2 224 732(13), РФ // Б.И. 2004. Заявка: 2002128714/15.
 57. *Шалыпин В.В., Онищенко Л.М.* Эффективность модифицированного карбамида УТЕС в агроценозе пшеницы мягкой озимой, выращиваемой в условиях чернозема выщелоченного Кубани // “Вектор современной науки”. Сб. тез. по мат-иалам Международ. научн.-практ. конф. студентов и молодых ученых. Краснодар, 2022. С. 412–413.
 58. *Козел Е.Г.* Получение капсулированных с ингибиторами форм мочевины и их влияние на активность уреазы и содержание азота в почве // *Инновации и инвестиции*. 2019. № 10. С. 221–225.
 59. *Li Y., He M.R., Dai X.L., Dong Y.J.* Preparation of dual controlled release urea with nitrogen inhibitor and resine coating and the effects on soil nitrogen supply capacity and wheat yield // *J. Plant Nutr. Fertil.* 2020. № 26(09). P. 1612–1624.
 60. *Qi Z., Dong Y., He M., Wang M., Li Y., Dai X.* Coated, stabilized enhanced-efficiency nitrogen fertilizers: Preparation and effects on maize growth and nitrogen utilization // *Front Plant Sci.* 2021. № 12. 792262. DOI: 10.3389/fpls.2021.792262
 61. *Linquist B.A., Liu L.J., Kessel C., Groenigen K.* Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: meta-analysis of yield and nitrogen uptake // *Field Crop Res.* 2013. № 154. P. 246–254.
 62. *Pan B., Lam S.K., Mosier A., Luo Y., Chen D.* Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2016. № 232. P. 283–289.
 63. *Wang W., Park G., Reeves S., Zahmel M., Heenan M., Salter B.* Nitrous oxide emission and fertilizer nitrogen efficiency in a tropical sugarcane cropping system applied with different formulations of urea // *Soil Res.* 2016. № 54. P. 572–584.
 64. *Wang W.J., Reeves S.H., Salter B., Moody P.W., Dalal R.C.* Effects of urea formulations, application rates and crop residue retention on N₂O emissions from sugarcane fields in Australia // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2016. № 216. P. 137–146.
 65. *Snyder C.S., Bruulsema T.W., Jensen T.L.* Greenhouse gas emissions from cropping systems and the influence of fertilizer management. Norcross: International Plant Nutrition Institute, 2007. 242 p.
 66. *Pasda G., Hahndel R., Zerulla W.* Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops // *Biol. Fertil. Soil.* 2001. № 34. P. 85–97.
 67. *Frye W.W.* Nitrification inhibition for nitrogen efficiency and environment protection // IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers. Frankfurt, 2005. P. 139–145.
 68. *Жевора С.В.* Реакция сортов картофеля на введение в систему минерального питания стабилизированного карбамида УТЕС 46 // *Плодородие*. 2021. № 3. С. 76–80. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.14
 69. *Козел Е.Г.* Сравнительная оценка применения медленнодействующих форм карбамида при выращивании листового салата на выщелоченных черноземах Тюменской области // *Агрономия*. 2020. № 3(60). С. 33–39.

70. Волкова М.А., Лапушкин В.М. Эффективность различных форм мочевины пролонгированного действия в посевах яровой пшеницы сорта Любава // “Актуальные проблемы и инновационные решения в области агрохимии (к 300-летию Российской академии наук и 220-летию со дня рожд. Юстуса фон Либиха”. Мат-лы 57-й Всерос. конф. с международ. участием молод. ученых, специалистов-агрохимиков и экологов. М., 2023. С. 129–135.
71. Кумейко Ю.В. Экспресс-диагностика азотного питания растений риса и влияние ингибитора нитрификации на качество крупы // Зернобоб. и круп. культ. 2014. № 4(12). С. 29–32.
72. Souza E.F.C., Rosen C.J., Venterea R.T. Co-application of DMPSA and NBPT with urea mitigates both nitrous oxide emissions and nitrate leaching during irrigated potato production // Environ. Pollut. 2021. № 284. 117124.
73. Sreethu S., Vandna Ch., Gurleen K. Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture // Innovations in Nutrient Management: Improving Efficiency and Crop Production. 2003. P. 132–145. URL: <https://www.researchgate.net/publication/374869932> (дата обращения: 21.02.2024).
74. Lewu F.B., Volova T., Thomas S., Rakhimol R.K. Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture. Academic Press, 2020. 266 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=x9PbDwAAQBAJ&pg=> (дата обращения: 26.02.2024).
75. Zhang S., Yang Y., Gao B., Li Y.C., Liu Z. Superhydrophobic controlled-release fertilizers coated with bio-based polymers with organosilicon and nano-silica modifications // J. Mater. Chem. A. 2017. № 5. 19943–19953. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ta/c7ta06014a> (дата обращения: 26.03.2024).
76. Сухова Н.В., Ефремова С.Ю., Визирская М.М., Зупарова В.В. Роль биомодифицированного азотного удобрения в оптимизации условий питания растений // Уч. зап. Крым. фед. ун-та им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2022. Т. 8(74). № 2. С. 176–183.
77. Димиев А.М., Брусько В.В., Гарифуллин Б.М., Селивановская С.Ю., Курынцева П.А. Применение биоразлагаемого хелатообразующего агента для удобрения микроэлементами: Пат. 2796821, РФ // Б.И. 2022. Заявка: 2022126826. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2796821C1/ru>. (дата обращения: 27.03.2024).
78. Ларионова Н.П., Шейн О.П. Сравнительная оценка экономических показателей при применении разных форм карбамида // Мир инноваций. 2022. № 2(21). С. 55–58.
79. Кумейко Ю.В., Паращенко В.Н., Кремзин Н.М. Влияние ингибитора нитрификации на эффективность азотного удобрения и сохранение плодородия почвы при возделывании риса // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 12(3). С. 85–87.

Ways to Increase the Effectiveness of Using Urea

A. A. Zavalin^{a, #}, L. A. Sviridova^a

^a D.N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry,
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia,

[#] E-mail: zavalin.52@mail.ru

The use of prolonged nitrogen fertilizers makes it possible to reduce doses by 20–30% and the cost of their use. The use of prolonged forms of nitrogen fertilizers improves the quality of plant products by reducing their nitrate content. Various modifications of urea are used: fertilizers of prolonged action due to the weak solubility of granules, encapsulated fertilizers, fertilizers modified with urease and nitrification inhibitors, fertilizers with controlled release of nutrients, biomodified fertilizers, matrix fertilizers. The use of such fertilizers provides an increase in the nitrogen utilization rate of fertilizer by plants, reduces its gaseous losses, and increases crop yields. In addition, the use of modified forms of urea reduces the negative impact on the environment. The release of gaseous forms of nitrogen when using encapsulated urea with urease and nitrification inhibitors is 2 times slower. The efficiency of using carbamide modified with inhibitors, according to vegetation and field experiments on spring wheat, expressed in an increase in grain yield by 9–12%; the nitrogen utilization rate of fertilizers (UF) was 16–27% higher. The increase in winter wheat grain yield can be 5–21%, the nitrogen utilization factor (UF) can be 5–18% higher. The yield of corn may increase by 6–17%, and the nitrogen content of the plant may increase by 17–20%. The increase in rice yield when using carbamide with nitrification or urease inhibitors varies from 3 to 23, lettuce – 11, potatoes – 10–11%.

Keywords: urea, modified urea, yield and product quality, nitrogen utilization factor (CI), nitrogen losses of fertilizers.