



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра геоэкологии, природопользования и экологической безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На тему Анализ воздействия некоторых ингибиторов на изменение азотных  
соединений в почве

Исполнитель Устюжанина Кристина Алексеевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат биологических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Рижия Елена Яновна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Дроздов Владимир Владимирович  
(фамилия, имя, отчество)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

Глава 1 Роль азота в природе .....	9
1.1. Азот, основные свойства .....	9
1.2. Круговорот азота .....	10
1.3. Основные азотные удобрения .....	12
Глава 2. Химические препараты, используемые в качестве ингибиторов .....	17
2.1. Ингибиторы нитрификации .....	17
2.1. Зарубежный опыт использования ингибиторов нитрификации в почвах	19
2.2. Отечественные исследования ингибиторов нитрификации в почвах...	22
Глава 3 Объекты и методы исследования .....	26
3.1. Объекты .....	26
3.1.1. Почва .....	26
3.1.2. Удобрение .....	27
3.1.3. Ингибиторы .....	28
3.1.4. Зерновая культура .....	33
3.2. Методы .....	36
Глава 4. Результаты и их обсуждение .....	38
4.1 Фенологические наблюдения .....	38
4.2. Биомасса озимой пшеницы в конце эксперимента .....	43
4.3. Изменение концентрации азота в почве и в растениях в вариантах эксперимента .....	45
4.4. Эмиссия аммонийного азота и закиси азота из почвы вариантов эксперимента .....	52
Заключение .....	60
Рекомендации .....	62
Список литературы .....	64

## СОКРАЩЕНИЯ

КАС-32	Карбамидаммиачная смесь с долей азота 32%
ATS	Тиосульфат аммония
NBPT	n-бутил тиофосфорный триамид
NH <sub>3</sub>	аммиак
N <sub>2</sub> O	Закись азота
Вн.	Внутипочвенное внесение химикатов
Пов.	Поверхностное внесение химикатов

## Введение

В настоящее время в сельском хозяйстве для восполнения растениям необходимых питательных веществ (таких как азот, фосфор, калий, сера, кальций и магний) используют удобрения, путем внесения их в почву в твердом или жидком виде. Минеральные удобрения стали важнейшим условием для поддержания здоровья, общего качества, роста и урожайности многих культурных растений, имеющих важное значение для современной цивилизации - получения пищевых продуктов, кормов в сельском хозяйстве, лекарств, промышленного и иного сырья и других целей [1].

Наиболее дорогостоящим и урожае ограничивающим питательным элементом в производстве сельскохозяйственных культур является азот. Основным источником азота для растений являются соли азотной кислоты (нитраты) и соли аммония. В естественных условиях питание растений азотом происходит путем потребления ими аниона  $\text{NO}_3^-$  (нитрат) — и катиона  $\text{NH}_4^+$  (аммоний), находящихся в почвенном растворе. Поступившие в растения минеральные формы азота проходят сложный цикл превращения из нитратной формы в аммонийную [2].

В агроценозах азотные удобрения являются одним из основных источников жизнедеятельности культур, потому как уплотняют корневую систему, способствуют появлению новых вегетативных органов, а также быстрому росту и развитию генеративных. Компоненты азотных удобрений фитосанитарны. Но они могут как стабилизировать культуру, так и дестабилизировать ее.

Правильно подобранная схема минерального питания дает возможность увеличить рентабельность сельхозпроизводства. Например, большой популярностью пользуется карбамидо-аммиачная селитра (смесь КАС-32), поскольку на протяжении длительного времени смогла доказать свою эффективность на практике. Смесь регулирует не только азотный, но и серный баланс растений. Ее получают путем добавления аммиачной селитры в

растворенную смесь водных карбамидов. В итоге получается жидкое удобрение, которое удобно вносить, транспортировать и использовать для достижения высоких результатов с пролонгированным эффектом.

Основными преимуществами нитрат-содержащих удобрений является создание условий для их эффективного поглощения растениями. Нет необходимости немедленной заделки нитрат-содержащих удобрений в почву, поскольку нитраты не летучи и легко мигрируют по профилю почвы с током воды [3]. Многочисленные исследования показали, что при внесении в почву азотных удобрений культура усваивает в лучшем случае 50% азота из удобрений. Остальное же улетучивается или вымывается, что напрямую зависят от ряда факторов: скорости процесса нитрификации, температуры и влажности почвы, pH среды и механического состава почвы. Улетучивание характерно для таких веществ, как аммиак и  $\text{NO}_x$ , (где  $x$  равен 1, 2 или 3), в том числе и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) – третьего парникового газа после диоксида углерода и метана, обладающего потенциалом глобального потепления в 310 раз выше, чем у диоксида углерода. Водный сток наблюдается в связи с прекрасной растворимостью в воде нитритов и нитратов. Это приводит к существенной потере содержания азота в удобрении, влияющей на расходы АПК. Таким образом, потери азота из почвы приводят не только к загрязнению воды, усилению эвтрофикации, но и к загрязнению атмосферы [4].

Потери азота в почве также возникают при воздействии на азот и азотсодержащие соединения ферментов, подобных ферменту уреазы. Воздействие посредством фермента уреазы приводит к разложению мочевины до диоксида углерода и аммиака. Биологические окисления почвенными микроорганизмами, такими как бактерии рода *Nitrosomonas*, аммиачного азота до нитратного азота также являются причиной уменьшения содержания азота в почве с течением времени. В то время как преобразование мочевины в аммиак и окисление аммиака до нитратов в почве является

преимущественным для растений, преобразования, происходящие в верхней части почвы, куда вносят удобрения, также приводят к потере азота.

Требуется увеличение продолжительности нахождения азота в почве для обеспечения его более постоянного уровня в течение периода вегетации, при уменьшении числа внесений удобрения в виде периодических подкормок, что позволит снизить общие затраты в сельскохозяйственной отрасли, в то же время ограничивая количество азота, вымываемого в водотоки и улетучивающегося в атмосферу.

Одним из путей повышения эффективности азотных удобрений и увеличения продуктивности выращиваемых культур служит применение ингибиторов нитрификации. Смешивание удобрений с ингибиторами нитрификации (ИН) – это технология снижения потерь азота (N). Эти химические соединения замедляют превращение аммония в нитраты в почве, подавляя активность бактерий-нитрификаторов. Следовательно, когда вносятся удобрения, они предварительно смешиваются с нитратами. Цель данного действия состоит в том, чтобы улучшить синхронизацию между поставками азота и потребностями сельскохозяйственных культур, повысить эффективность использования азота и снизить потери нитратов. Доказательства снижения выбросов оксидов азота были представлены в различных исследованиях.

Оценивая огромную важность экологических преимуществ использования ингибиторов, важно также учитывать экономические затраты и прибыль от использования ИН. Возможность экономии азотных удобрений, сокращения количества внесений или повышения производительности — это преимущества, которые оправдывают более высокую цену азотных удобрений для фермеров как жизнеспособной альтернативы по сравнению с обычными удобрениями. Таким образом, определение систем земледелия или условий окружающей среды, в которых ИН увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур, может способствовать передовой практике этой технологии удобрений [5-8]. В результате повышается отдача от

применяемых азотных удобрений, а также создаются предпосылки к улучшению экологической обстановки земного шара. Данные ингибиторы, как правило, наносят на поверхность гранул удобрения или добавляют в жидкие удобрения через водный раствор [9].

В настоящее время разработаны усовершенствованные продукты ингибирования азота. В России изучается действие следующих ингибиторов:

3,4-Диметилпиразолфосфат (DMPP) — мощный ингибитор нитрификации, который широко используется в сельском хозяйстве. DMPP известен под многими синонимами, включая DMPP-HCl, 3,4-диметил-2H-пиразолфосфат и 3,4-диметилпиразолфосфат.

N-(н-бутил)-тиофосфорный триамид (NBPT) является известным ингибитором уреазы, который отсрочить гидролиз мочевины в почве. Уреаза является ферментом, который катализирует гидролиз мочевины в двуокись углерода и аммиак. Ингибирование уреазы позволяет удобрению выщелачиваться или связываться в почве перед гидролизом до аммиака и захватываться коллоидами почвы, тем самым уменьшая потери газообразного азота. NBPT может поглощаться растениями, не причиняя им вреда. Эффективная доза NBPT для уменьшения эмиссии NH<sub>3</sub> составляет до 1 мг г<sup>-1</sup> карбамида. Поскольку эмиссия NH<sub>3</sub> происходит обычно спустя 2-5 дней после внесения карбамида NBPT оказывает эффективное влияние на карбамидамидогидролазную активность сравнительно короткое время. Продолжительность эффективного влияния NBPT на карбамидамидогидролазную активность составляет 10-15 суток в почвах умеренного климата.

Тиосульфат аммония, сокращенно вещество называют ATS (Ammonium ThioSulfate). Он замедляет образование аммония из амидной формы, благодаря чему азот менее подвержен испарению и вымыванию.

В ходе исследований, производственных испытаний и практического использования ингибиторов нитрификации перед экологической наукой возник ряд задач, связанных с недостаточной изученностью возможных

последствий систематического их применения на эмиссию парниковых газов в атмосферу. Кроме того, на Северо-Западе Российской Федерации основные почвы, используемые в сельскохозяйственном использовании – легкого гранулометрического состава. Поэтому исследования по влиянию различных ингибиторов на потери азота из дерново-подзолистых супесчаных почв являются актуальными. В ходе исследований, производственных испытаний и практического использования ингибиторов нитрификации перед агрохимической наукой возник ряд новых задач, связанных с недостаточной изученностью возможных последствий систематического их применения.

Цель исследования - изучить эффективность ингибиторов нитрификации на дерново-подзолистой супесчаной почве при выращивании озимой пшеницы.

Задачи исследования:

1. Анализ литературных источников о мировом опыте применения ингибиторов нитрификации в сельском хозяйстве
2. Проведение лабораторного эксперимента с тремя различными ингибиторами нитрификации на дерново-подзолистой супесчаной почве
3. Исследование динамики минерального азота в вариантах опыта
4. Сравнительная характеристика эмиссии аммиака и закиси азота из вариантов дерново-подзолистой супесчаной почвы
5. Практические рекомендации по использованию изученных ингибиторов нитрификации

## Глава 1 Роль азота в природе

### 1.1. Азот, основные свойства

Азот (N), пожалуй, самый известный элемент 15-й группы, один из наиболее широко распространенных в природе, поскольку это самый распространенный газ в атмосфере Земли, он бесцветен, не имеет запаха и неактивен. Хотя N не содержится в минеральных формах, таких как фосфор (P) или калий (K), он в значительной степени присутствует в органических соединениях.

Почвенный азот претерпевает множество сложных биологических преобразований, которые затрудняют управление им. Он мало растворим в воде, но его растворимость зависит от температуры и давления окружающей среды. Данный элемент находится в природе, как не горящий газ при нормальной температуре и нормальным давлением. Данный газ немного легче воздуха, поэтому его концентрация прямо пропорционально с высотой. Когда уменьшается температура азота до точки кипения, то азот становится бесцветной жидкостью. Данное состояние азота при определенной температуре и давлении кристаллизуется. Азот — это плохой проводник электроэнергии и тепла, также он трудно растворяется в воде и других жидкостях. Азот имеет инертные свойства. При высоких температурах и высоком давлении азот реагирует с металлами, газами.

Азот взаимодействует при нагревании до не высоких температур только с активными металлами (кальций, литий, магний), с другими элементами он контактирует только при высокой температуре и при наличии катализаторов. Являясь нейтральным газом, азот не оказывает влияния на растворы лакмусовых кислот. Чтобы преодолеть неактивную природу азота, реакции с участием азота в его элементарной форме часто требуют присутствия электрической искры или сильного нагрева, чтобы разорвать тройную ковалентную связь.

При атмосферных разрядах во время грозы образуются оксиды азота в воздухе. Так же под действием ионизирующего излучения на смесь азота можно получить оксид. Когда в воде растворяется азотный  $N_2O_5$  и азотистый  $N_2O_3$  ангидрид, то в результате получается азотистая кислота  $HNO_2$  и азотная кислота  $HNO_3$ , которые образуют соли, такие как нитраты и нитриты. Азот при высокой температуре и наличии ингибитора может соединиться с водородом, что образует аммиак. Азот входит в состав очень многих важнейших органических соединений (амины, аминокислоты, нитросоединения и других).

Многие метаболические процессы у растений и животных зависят от азота. Пожалуй, самая известная роль N заключается в образовании аминокислот, которые составляют строительные блоки белка. Суточная потребность человека в белке колеблется от 40 до 70 граммов, в зависимости от пола, возраста и размера. Примерно половина продуктов питания, производимых сейчас в мире, поддерживается за счет использования азотных удобрений.

## 1.2. Круговорот азота

Круговорот азота — это биогеохимический процесс, в ходе которого азот преобразуется во многие формы, последовательно переходя из атмосферы в почву, в организм и обратно в атмосферу. Он включает в себя несколько процессов, таких как фиксация азота, нитрификация, денитрификация, распад и гниение. Круговорот азота — это важный круговорот вещества, который происходит в природе, и основная часть круговорота происходит с взаимодействием биосферы, а также на прямую связан с почвой.

Газообразный азот существует как в органической, так и в неорганической форме. Органический азот существует в живых организмах и проходит через пищевую цепь при поедании других живых организмов.

Неорганические формы азота в изобилии встречаются в атмосфере. Этот азот становится доступным для растений благодаря симбиотическим бактериям, которые могут превращать инертный азот в полезную форму, такую как нитриты и нитраты.

Азот претерпевает различные виды трансформации для поддержания баланса в экосистеме. Причем этот процесс распространяется на различные биомы, причем морской азотный цикл является одним из сложнейших биогеохимических циклов. Круговорот азота начинается с того, что он из атмосферы, поступает в клетки живых организмов, следующим этапом является поступление фиксированного азота в почву, в следствии через корневую систему азот поступает в растения, далее по трофическим цепям поступает в организмы живых организмов (рис.1). После увядания растений и кончины живых организмов происходит процесс разложения, в следствии данного процесса азот снова попадает в почву, что в дальнейшем снова приводит попадание азота в растения или в атмосферу. Процессы вымывания и растворения азота из почвы вносят существенный вклад в круговорот азота, из почвы азот попадает в водные объекты, что в дальнейшем азот снова в атмосферу или в живые организмы гидробионтов. Минеральные и органические азотсодержащие удобрения — это основные источники поступления азота в почву.

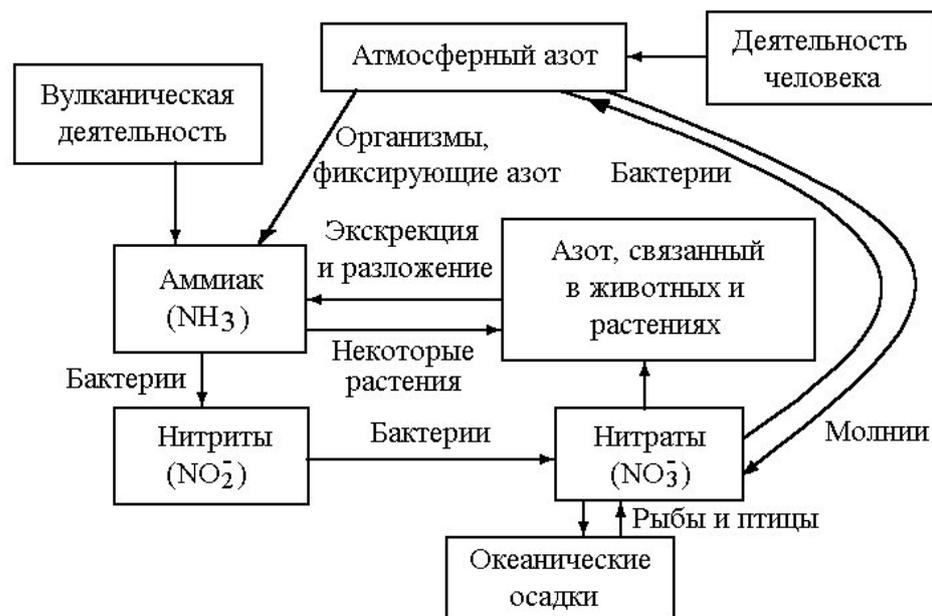


Рис 1. Круговорот азота в природе

Растения и животные могут усваивать фиксированный кислород. Фиксируется лишь меньшая доля азота абиогенным путем, в последствии грозы и атмосферным космическим излучением, который приводит к образованию оксидов азота и аммиака, которые в результате осадков поступают в почву. В клубеньковых бактериях и сине-зеленых водорослях, а также в некоторых морских организмах происходит фиксация азота биогенным путем.

### 1.3. Основные азотные удобрения

Недостаточное количество N, доступного растениям, может препятствовать росту и развитию. Азот также может улучшить рост корней, увеличить объем, площадь, диаметр, общую и основную длину корня, сухую массу и впоследствии увеличить поглощение питательных веществ, а также улучшить баланс питательных веществ и производство сухой массы [5, 6].

Применение азота повышает «зеленость» растений, скорость ассимиляции CO<sub>2</sub>, качество урожая и повышает устойчивость к стрессам

окружающей среды, таким как ограниченная доступность воды и засоленные почвы [7, 8].

Сельскохозяйственное производство и связанное с ним применение азотных (N) удобрений резко возросло за последнее столетие, и текущие прогнозы до 2050 года показывают, что спрос будет продолжать расти по мере роста населения. Применяемый как в органических, так и в неорганических формах удобрений, азот является важным питательным веществом для урожайности сельскохозяйственных культур.

Потребность в азоте является наиболее важной характеристикой растительного производства. Для успешного производства сельскохозяйственных культур применение азота более важно, чем использование других основных питательных веществ [10]. Медленное развитие растений и раннее старение листьев из-за дефицита N может привести к снижению как урожайности, так и качества сельскохозяйственных культур [11].

Чрезмерное и неэффективное использование азотных удобрений приводит к увеличению затрат на производство сельскохозяйственных культур и загрязнению атмосферы. Атмосферный азот (71%) в молекулярной форме недоступен для растений. Для устойчивого производства продуктов питания в мире и улучшения атмосферы существует острая необходимость повышения эффективности использования азота в системе сельскохозяйственного земледелия. Эффективность использования азота является произведением эффективности поглощения азота и эффективности использования азота и варьируется от 30,2 до 53,2%. Потери азота слишком велики из-за избыточного количества, низкой численности растений, плохих методов внесения и т. д., которые могут достигать 70% от общего доступного азота. Эти потери можно свести к минимуму до 15–30% за счет применения улучшенных агрономических подходов, таких как оптимальная дозировка азота, внесение азота с помощью датчиков растительного покрова, поддержание популяции растений, капельное фертигация и совмещение

культур на основе бобовых. Избыточное внесение азотных удобрений является обычной практикой среди сельхозпроизводителей [12], что нерентабельно для растениеводства, а избыток азота продлевает период вегетативного роста, задерживает созревание [13], снижает содержание сахара, а также привлекает насекомых-вредителей и вызывает эпидемии болезней. Учитывая рост стоимости азотных (N) удобрений и опасения по поводу негативного воздействия потерь N на окружающую среду, существует большой интерес к более точной настройке управления азотными удобрениями. Оптимальное управление азотными удобрениями требует понимания различных азотных удобрений.

Все азотные удобрения начинаются с источника газообразного водорода и атмосферного азота, которые вступают в реакцию с образованием аммиака. Наиболее используемым источником водорода является природный газ (метан). В некоторых регионах используются другие источники водорода, например, уголь. После того как водород и N соединяются в условиях высокой температуры и давления с образованием аммиака, можно производить многие другие важные N-содержащие удобрения. Мочевина является наиболее распространенным азотным удобрением, но многие другие превосходные азотные удобрения производятся из аммиака. Например, часть аммиака окисляется для получения нитратных удобрений. Такое же превращение аммиака в нитраты происходит в сельскохозяйственных почвах посредством микробного процесса нитрификации [26].

Поскольку производство газообразного водорода, необходимого для синтеза аммиака, в основном происходит из природного газа, цена этого первичного сырья является основным фактором себестоимости производства аммиака. Заводы по производству аммиака иногда закрываются или открываются в различных частях мира в ответ на колебания цен на газ. Более высокие затраты на электроэнергию всегда приводят к повышению цен на все азотные удобрения.

Азотные удобрения обычно выпускаются в одной из следующих форм: нитрат ( $\text{NO}_3$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ), аммоний ( $\text{NH}_4$ ) или мочеви́на ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ). Каждая форма имеет свои уникальные свойства, диктующие конкретные условия и способы ее использования.

Азотные удобрения явно вносят существенный вклад в поддержание достаточного количества питательных продуктов питания. Однако необходимо тщательное управление, чтобы азотные удобрения хранились в той форме и в том месте, где они могут быть наиболее полезны для поддержания здорового роста растений. Огромные выгоды от азотных удобрений должны быть сбалансированы с разрушительным воздействием на окружающую среду, которое может возникнуть, когда азот попадает в районы, где он нежелателен [1].

Синтетический азот, который сейчас широко используется в обычных удобрениях, помогает фермерам получать более высокие урожаи, чтобы прокормить растущее население мира. Однако, когда этот азот не полностью используется растущими растениями, он может быть потерян с полей фермы и отрицательно повлиять на качество воздуха и воды ниже по течению. Этот избыток азота может способствовать увеличению образования приземного озона, увеличению количества парниковых газов, изменяющих климат, и истончению защитного озонового слоя высоко в атмосфере Земли. Избыток азота также способствует образованию кислотных дождей, загрязнению питьевой воды и вызывает истощение кислорода и образование «мертвых зон» в водоемах, что наносит серьезный вред водной фауне [26].

Поэтому повышение эффективности использования азота удобрений и снижение негативного воздействия азота на окружающую среду стали предметом глобального интереса. В настоящее время идеальным методом является разумный контроль количества азотных удобрений и использование ингибиторов азотных удобрений. Существуют удобрения медленного действия, широко применяемые для контроля количества азотных удобрений, используемых в сельском хозяйстве. Этот тип удобрений может регулировать

скорость высвобождения, период высвобождения или количество высвобождаемых питательных веществ в зависимости от роста и развития сельскохозяйственных культур. Для мочевины, широко используемого и хорошо растворимого удобрения в сельском хозяйстве, можно наносить покрытия с медленным высвобождением, чтобы ограничить растворимость и задержать гидролиз мочевины и последующую нитрификацию [24].

Твердые азотные удобрения – к ним относятся такие разновидности, как мочевина, аммиачная селитра, сульфат аммония и кальциево-аммиачная селитра.

Жидкие азотные удобрения - к ним относятся такие разновидности, как растворы аммиачной селитры, карбамида и сульфата аммония.

Жидкие азотные удобрения имеют множество преимуществ перед твердыми. Эти преимущества таковы: более быстрое усвоение питательных веществ: жидкие удобрения растворяются в воде и быстрее и легче усваиваются растениями. Это позволяет быстро устранить дефицит питательных веществ и ускорить рост растений. Более равномерное распределение: жидкие удобрения равномерно распределяются путем смешивания с поливной водой или непосредственно в почву. Это обеспечивает растениям равный доступ к питательным веществам и предотвращает такие проблемы, как дефицит или избыток питательных веществ [12]. Более простое применение: жидкие удобрения можно легко вносить с помощью специального оборудования. Это экономит время и труд. Меньше загрязнения окружающей среды: жидкие удобрения создают меньше загрязнения окружающей среды по сравнению с твердыми удобрениями. Это снижает риск загрязнения питательных веществ, таких как азот и фосфор, в почву и водные ресурсы.

Таким образом, азотные удобрения оказывают значительное воздействие на окружающую среду. Чрезмерное применение азотных удобрений также может привести к деградации почвы, включая ее подкисление, снижение плодородия почвы и увеличение выбросов закиси

азота, мощного парникового газа, который способствует глобальному потеплению[16]. Кроме того, установлено, что применение азотных удобрений увеличивает концентрацию азота и фосфора в водосборах, что приводит к загрязнению воды и расширению гипоксических зон в водоемах. В целом, воздействие азотных удобрений на окружающую среду включает загрязнение воды, воздуха, деградацию почвы и усиление изменения климата.

## Глава 2. Химические препараты, используемые в качестве ингибиторов

### 2.1. Ингибиторы нитрификации

Ингибиторы нитрификации — это класс химических веществ, используемых для замедления процесса нитрификации путем ингибирования нитрифицирующих бактерий, которые продуцируют фермент аммиакмонооксигеназу, гидроксиламиноксидоредуктазу и редуктазу оксида азота[14].

Нитрификация происходит в два этапа: первый этап включает окисление  $\text{NH}_4^+$  до гидроксиламина ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ). Затем  $\text{NH}_2\text{OH}$  преобразуется в  $\text{NO}_2^-$  с помощью фермента НАО. На втором этапе нитрификации  $\text{NO}_2^-$  окисляется до  $\text{NO}_3^-$ .

$\text{NO}_3^-$ , образующийся в процессе нитрификации, может привести к потерям N из-за выщелачивания или денитрификации-. Механизм действия большинства ингибиторов нитрификации заключается в ингибировании АМО на первом этапе нитрификации.

Ингибиторы нитрификации вызвали интерес как возможная стратегия снижения выбросов N<sub>2</sub>O выбросы, а также сокращение загрязнения воды, связанные с использованием удобрений. Некоторые примеры ингибиторов нитрификации включают DCD и DMPP, тиомочевину, сероводород (CS<sub>2</sub>), тиоэфиры, этилен: C<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>, 2-этинилпиридин, 3-амино-1,2,4-триазол, N-2,5-дихлорфенилсанктинаминовую кислоту (DCS), 2-амино-4-хлор-6-метилпиримидин (AM), нитрапирин (NP) и тиосульфат аммония (ATS), и N-[3(5)-метил-1H-пиразол-1-ил) метил] ацетамид (MPA)

Один из самых популярных ингибиторов нитрификации является Дициандиамид (DCD). Это неорганическое кристаллическое твердое вещество, которое способно разлагаться в почве образуют мочевины CO<sub>2</sub> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. К его физико-химическим свойствам относится то, что он хорошо растворим в воде, а также он склонен к вымыванию из зоны укоренения. Американские исследователи провели эксперимент, в результате которого выяснилось, что скорость разложения, данного ингибитора нитрификации, не зависит от температуры и влажности. В следствии чего была выдвинута гипотеза, что скорость разложения камбизола и глейзоля связана с содержанием органических веществ, а также микробиологической активности[23].

Нитрапирин это ингибитор нитрификации из обретенной американскими учеными в 1974 году. На данный момент данные ингибитор используются в северной Америке по его прямому назначению, а это увеличение скорости превращения аммония в нитрат в процессе нитрификации. Данные ингибитор используют при производстве кукурузы, а также при выращивании пшеницы. По физическим свойствам он летучий, из-за его используют при совместном с безводным аммиаком. Из-за его свойства у него высокое давление паров, вследствие чего его вносят в почву путем инъекции. 1 из плюсов питера это его стойкость при низких температурах. Его используют при зимнем и осеннем внесении азотных удобрений. Недостаток — это то, что он является соединения хлор органического типа.

DMPP - 3,4-диметилпиразол фосфат. Является медно - селективным хилатом, который ингибируется ферментом моноаминоксидазы, который в свою очередь является необходимым для нитрификации. Данный ингибитор возможно использовать при совместном внесении с твердыми и жидкими удобрениями. ЭDMPP является более мощным ингибитором, чем DCD, с гораздо меньшей нормой внесения — 0,5–1,5 кг/га; Время ингибирования нитрификации составляет приблизительно 4 - 10 недель. Данный показатель зависит от климатических условий, а также почвенного покрова.

3,4-Диметилпиразол янтарная кислота (DMPSA)- является новым типом ингибитором нитрификации тарификации, он более стабилен в основных условиях чем ингибитор нитрификации DMPP, того, что в нем присутствуют янтарная группа. Учеными было доказано, что в сочетании с мочевиной он снижает выбросы N<sub>2</sub>O на 60–90% по сравнению со стандартными необработанными удобрениями. Также было выявлено что NO<sub>3</sub> - выявляется в меньших количествах, когда, используя данные ингибитор, также он успешно поддерживает содержание аммония.

Внесение ингибиторов нитрификации задерживает активность бактерий, в следствии чего аммиак время прикреплен к поверхностному слою почвы, что помогает прорасти корням растений. Также ингибитор способен поддерживать низкие значения нитратов, снижать потенциальные потери азота из - за денитрификации в периоды проливных дождей.

## 2.1. Зарубежный опыт использования ингибиторов нитрификации в почвах

Австралия — это одна из немногих стран, которые используют ингибиторы нитрификации в сельском хозяйстве и животноводстве. Современные молокозаводы Австралии опираются на поступление азотных удобрений, которые поддерживают экономическую составляющую производства. Тем не менее применения азотных удобрений на молокозаводах

Австралии могут допустить экологические риски связанные с тем что потерями азота из молочных систем и представляют собой издержки. В Австралии ингибитор азотного цикла применяют совместно с азотными удобрениями, данный способ помогает замедлить превращение мочевины в аммоний и уменьшения потери за счет испарения также, а этот способ помогает замедлить превращения аммоний нитрат. Способ замедления превращения аммоний нитрат, а способствует тому, чтобы минимизировать все вымывания нитратов и также и миссию за счет нитрификации и денитрификации. Одна из компаний Австралии провела исследования запасов азота в почве. Статистика велась по запасам азота в почве с среди продуктов пастбищ, в половины которых был внесен ингибитор нитрификации 3 - 4 диметил р - разов фосфат и мочевиной, а также ингибитором уреазы п - бутил 3 амид фосфорной кислоты и мочевина. После проведенного учета было выявлено что применение азота способствует снижению эмиссии газов и способствует эффективности ингибиторов. Таким образом сделали заключение о том, что ингибиторы нитрификации эффективно при использовании удобрений.

В Европейском Союзе одной из стратегий минимизации потерь N является использование удобрений повышенной эффективности, обогащенных ингибитором нитрификации, таким как нитрапирин. В почвах и воде нитрапирин ингибирует активность монооксигеназы аммония — микробного фермента, катализирующего первый этап нитрификации аммония в нитрит. Потенциальные выгоды от использования ингибиторов нитрификации варьируются от снижения выщелачивания нитратов и выбросов закиси азота до повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Однако степень этих выгод зависит от условий окружающей среды и практики управления. Таким образом, такие преимущества не всегда реализуются. Кроме того, было показано, что нитрапирин транспортируется за пределы поля, и неизвестно, какое влияние нитрапирин из окружающей среды может оказать на нецелевые организмы и экологический цикл азота.

Здесь мы рассматриваем агрономические и экологические преимущества и затраты на использование нитрапирина и представляем ряд исследовательских вопросов и соображений, которые необходимо решить в будущих исследованиях ингибиторов нитрификации.

Уругвай также входит в состав стран, которые занимаются исследованием ингибиторов нитрификации на биологическую активность. Уругвай использовал нитрификации по исследованию биологической активности рисовых корней в 2 разных почвах. Корни риса могут контролировать нитрификацию выделяя биологические ингибитор нитрификации тем самым уменьшая потери азота в сельскохозяйственных почвах. Результаты эксперимента являлось то, что эмиссия в почвах варьировалась от того какой сорт был посажен и типа почвы особенно от содержания в неорганических веществах.

Газообразные потери аммиака можно значительно снизить, если мочевины смывать в почву дождем, поливной водой или непосредственно вносить в почву. Однако во многих случаях это невозможно (например, из-за озимых культур, пастбищ, отсутствия орошения, засушливых земель, зон нулевой обработки почвы и т. д.). Первый и наиболее очевидный вариант снижения выбросов аммиака — использование удобрений на основе аммиачной селитры.

Еще одним способом снижения потерь аммиака является обработка удобрений на основе мочевины ингибиторами уреазы. Это эффективно задерживает их превращение в аммиак и карбаминую кислоту примерно на две недели, блокируя действие фермента уреазы.

Пик pH вокруг частиц мочевины исключается, а образование аммиака снижается. Интенсивность замедления гидролиза мочевины зависит от количества нанесенного ингибитора уреазы. Максимальное сокращение потерь аммиака составляет примерно 80%, и, по оценкам ЕЭК ООН, эта технология может снизить потери аммиака в среднем на 70%.

Также изучением влияние ингибиторов нитрификации на сельскохозяйственный сектор занимается северная часть Испании. В данном месте провели исследование на посевах пшеницы в период исследования сравнивали 2 способа посева пшеницы традиционными и способы с минимальной обработки почвы. Во время эксперимента были учтены такие параметры как урожайность, качество зерна, а также эффективность использования азота. При всем при этом главной задачей исследовательского института было измерения парниковых газов. Эмиссия закиси азота является парниковым газом, а как всем известно парниковый газ вызывает глобальное потепление сильнее чем углекислый. Таким образом большинство стран мира сейчас разрабатывают пути по оптимизации использования азотных удобрений. Один из вариантов по сокращению выбросов парниковых газов является применение ингибиторов нитрификации в почву. Ингибиторы замедляют активность бактерий тем самым снижая аммиачный азот. В результате всего эксперимента был сделан вывод о том, что использование ингибиторов нитрификации при совместном использовании с минеральным удобрением улучшила развития культур меньше выбросы парниковых газов без ущерба для урожая.

Ингибиторы нитрификации можно добавлять в удобрения или наносить непосредственно на пастбище. Они широко доступны за рубежом, и до 2011 года на некоторых фермах Новой Зеландии использовался ингибитор дициандиамид (DCD). Однако обнаружение следовых остатков в молоке привело к изъятию DCD с рынка Новой Зеландии, а это означает, что новозеландские фермеры имеют ограниченные возможности по сокращению выбросов закиси азота из пластырей с мочой.

Таким образом на основании проведенных экспериментов во многих странах сделано заключение что ингибиторы индивидуально подбираются для каждого географического района точно также как и подбирается количественная доза, а также способы применения.

## 2.2. Отечественные исследования ингибиторов нитрификации в почвах

На протяжении последних десятилетий Российской Федерации занимается изучением азотных показателей в сельскохозяйственной сфере. Как известно выбросы газообразной формы азота из сельскохозяйственных почвы очень велики. Что способствует увеличению парниковых газов. Если рассматривать данный аспект в масштабах страны, то сельскохозяйственная почва вносит огромный неблагоприятный вклад в образование парниковых газов. Именно поэтому многие исследовательские институты заняты решением данной экологической проблемы.

Многие исследования, которые проводились по изучению влияния ингибиторов нитрификации с совместным внесением КАС, показали эффективность снижения эмиссии парниковых газов.

Главными задачами в исследовании является изучение влияния разных форм азотных удобрений и ингибиторов нитрификации на изменение количества эмиссии парниковых газов, также на качество зерновых культур, таких как озимая пшеница, ячмень, кукуруза. Также проводится оценка агрономической и экономической эффективности использования удобрений ингибиторов.

В результате были сделаны следующие выводы: после полевого опыта с использованием ингибиторов нитрификации на ячмень и озимую пшеницу установили, что влияние минерального удобрения по своей агрономической эффективности равнозначно безводному аммиаку и твёрдым азотным удобрением. при этом внесение ингибиторов нитрификации повышал эффективность потребления азота растениями. также было сделано заключение о том, что в результате применения ингибиторов можно изменить технологии выращивания культур. Изменение технологии заключается в том, что возможно разовое осеннее внесение КАС с ингибиторами нитрификации вместо использования старого метода дробного применения удобрения, тем самым это позволит уменьшить на  $1/3$  дозы вносимого азота под озимые

культуры без снижения урожайности и качества зерновых культур, тем самым сохраняя продовольственную безопасность. Использование ингибиторов карбамидамидогидролазной активности является одним из эффективных способов уменьшения газообразных потерь азота из карбамида, внесенного на поверхность почвы [46]. Среди ингибиторов карбамидамидогидролазной активности N(п-бутил) тиофосфорный триамид (NBPT, торговая марка – Agrotain) пользуется наибольшим успехом [26]. Доля NBPT в применяемом карбамиде сейчас составляет в среднем 53% [38].

Одним из важных преимуществ НТФТ является его растворимость и диффузивность, которые также характерны для карбамида, и поэтому ускоряют ингибиторное влияние на гидролиз карбамида [48].

NBPT не является прямым ингибитором карбамидамидогидролазной активности. После внесения в почву NBPT превращается в более окисленную форму - N-(п-бутил) фосфорный триамид, который формирует тридентатный лиганд с карбамидамидогидролазой и только замедляет гидролиз карбамида [33]. Факторы влияния на эту конверсию ещё не выяснены, но она происходит быстрее в аэробных условиях - минуты, часы, чем в анаэробных условиях – дни [49].

Наряду с замедлением гидролиза карбамида, NBPT может предотвращать формирование неблагоприятных зон с повышенными значениями pH вокруг гранул карбамида.

Таким образом, NBPT способствует замедлению формирования и уменьшению эмиссии  $\text{NH}_3$  из почв после внесения карбамида [35]. Количественные данные о влиянии NBPT на эмиссию  $\text{NH}_3$  из почв противоречивы. Например, [32] сообщили, что его применение способствовало уменьшению эмиссии  $\text{NH}_3$  на 96%. Однако, согласно Bishop и Manning (2010), применение NBPT совместно с разными дозами карбамида способствовало уменьшению эмиссии  $\text{NH}_3$  из почв в среднем только на 7.2%-11.8%. [42] сообщили, что эмиссия  $\text{NH}_3$  из кислых почв уменьшилась на 78% после поверхностного внесения карбамида. Поэтому точная оценка влияния

NBPT на карбамидамидогидролазную активность и эмиссию  $\text{NH}_3$  должна учитывать основные свойства почв: кислотность, содержание влаги и кислорода, влагопроводность, выщелачивание, температура, а также количество осадков.

NBPT может поглощаться растениями, не причиняя им вреда [22]. Эффективная доза NBPT для уменьшения эмиссии  $\text{NH}_3$  составляет до  $1 \text{ мкг г}^{-1}$  карбамида [38]. Поскольку эмиссия  $\text{NH}_3$  происходит обычно спустя 2-5 дней после внесения карбамида NBPT оказывает эффективное влияние на карбамидамидогидролазную активность сравнительно короткое время. Продолжительность эффективного влияния NBPT на карбамидамидогидролазную активность составляет 10-15 суток в почвах умеренного климата [49].

Тиосульфат аммония, ATS,  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ , менее широко используется в качестве ингибитора карбамидамидогидролазной активности почв [44]. Согласно результатам McCarty et al. (1990), ATS, спустя 3 дня после внесения, способствовал уменьшению карбамидамидогидролазной активности на 33-63% только в концентрациях  $2500-5000 \text{ мкг г}^{-1}$  почвы, тогда как эффективная концентрация NBPT не превышала  $1 \text{ мкг г}^{-1}$  почвы и этот ингибитор снижал карбамидамидогидролазную активность на 62-80%. По мнению авторов, ATS являлся слабым ингибитором карбамидамидогидролазной активности в суглинистых почвах с высокими значениями  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  (6.1-8.1). Результаты исследований [35] выявили более эффективное влияние ATS (на 70-88%) в меньших дозах на карбамидамидогидролазную активность песчаных почв. Применение ATS для уменьшения карбамидамидогидролазной активности более тяжёлых по гранулометрическому составу почв не рекомендуется. ATS характеризуется нестабильностью в почвах и окисляется до стабильного тетрадионата, который в действительности является ингибитором карбамидамидогидролазной активности. Кроме того, внесение ATS в почву способствует увеличению концентрации подвижных катионов железа и марганца, которые изменяют расположение сульфидрильных групп в

каталитических центрах фермента и уменьшают карбамидамидогидролазную активность [34]. ATS рекомендуется использовать в качестве удобрения для питания растений азотом и серой, и как слабый ингибитор карбамидамидогидролазной активности

## Заключение

1. Проведен анализ мирового опыта использования ингибиторов в практике сельского хозяйства на примере Испании, Китая и Российской Федерации. Показано, что при внесении в почву азотных удобрений совместно с ингибиторами позволяет зерновым культурам усваивать азот из удобрений, увеличивать урожайность и снижать эмиссии парниковых газов. Однако, внесение ингибиторов экономически затратно, т. к. 1кг подобных химических веществ соизмерим со стоимостью минеральных удобрений.

2. Внесение минерального удобрения (КАС-32) позволило существенно увеличить биомассу озимой пшеницы по сравнению с контролем. Внесение КАС-32 поверхностно привело к существенному увеличению биомассы озимой пшеницы, в 1,7 раза по сравнению с контролем, а внутрипочвенно – в 1,9 раз.

3. Совместное поверхностное внесение КАС с АТС и DMPP в дерново-подзолистую супесчаную почву не привело к достоверным различиям в биомассе растений по сравнению с биомассой растений в вариантах с КАСпов, в то время как внутрипочвенное внесение – достоверно увеличило урожай на 20-30 %. Наилучшие данные были установлены при использовании NBPT

4. Внесение в почву КАС способствовало значительному увеличению концентрации в ней доступных для растений форм минеральных соединений азота. В вариантах с совместным поверхностным и внутрипочвенным внесением КАС и NBPT содержание аммонийного и нитратного азота было больше, по сравнению с другими изучаемыми ингибиторами.

5. Сами по себе ингибиторы не влияли на накопление данной формы азота в почве, по сравнению с контролем, так и по сравнению с вариантами с КА, внесенным, как поверхностно, так и внутрипочвенно.

6. Внесение минерального удобрения (КАС-32) поверхностно существенно (в 15 раз) увеличило эмиссию аммиака из почвы по сравнению с контролем. Тогда как внесение DMPP поверхностно – позволило снизить данный показатель в 7 раз, а NBPT и ATS – в среднем в 16 раз по сравнению с вариантом КАС. Внесение КАС-32 внутрипочвенно достоверно увеличило эмиссию аммиака из почвы в 3 раза по сравнению с контролем, но внесение удобрения с ингибиторами снизило данный показатель в 2 раза.

7. Внесение КАС-32 поверхностно существенно (в 1,7 раза) увеличило эмиссию закиси из почвы по сравнению с контролем. Тогда как внесение DMPP поверхностно – позволило снизить данный показатель в 1,6 раз, а NBPT и ATS – в среднем в 1,5 раз по сравнению с вариантом КАС.

8. Внесение КАС-32 внутрипочвенно достоверно увеличило эмиссию аммиака из почвы в 1,5 раза по сравнению с контролем, но внесение удобрения с ингибиторами снизило данный показатель в 1,4 раза

9. Показана целесообразность совместного применения ингибиторов нитрификации с КАС при выращивании озимой пшеницы на дерново-подзолистых супесчаных почвах Ленинградской области. За счет введения в КАС ингибиторов нитрификации – DMPP, ATS и NBPT, в количестве 10% от N удобрения (10 кг/га при дозе 100 кг N/га) увеличивался урожай озимой ржи на 10-20 ц/га.

10. Кроме того, все ингибиторы существенно сокращали эмиссию аммонийного азота и закиси азота в атмосферу.

11. Сравнивая эффективность изученных ингибиторов нитрификации на исследуемые показатели их можно расположить в следующий убывающий ряд: NBPT > DMPP > ATS.

12. Практическая значимость результатов исследования заключается в расширении базы данных по применению ингибиторов в сельскохозяйственных почвах, как в России, так и во всем мире. Полученные экспериментальные данные можно будет использовать для создания моделей по снижению эмиссии парниковых газов из почв при помощи ингибиторов.

Показана целесообразность совместного применения ингибиторов нитрификации с КАС при выращивании озимой пшеницы в дерново-подзолистой супесчаной почве. За счет введения в КАС ингибиторов нитрификации – DMPP, ATS и NBPT, в количестве 10% от N удобрения (10 кг/га при дозе 100 кг N/га) увеличивалась биомасса на 10-20 ц/га.

## Рекомендации

Продовольственная безопасность остается в приоритете экономик всего мира, но, с другой стороны, сельское хозяйство, обеспечивающее население продуктами, относится к одному из главных источников эмиссии парниковых газов. Международные климатические соглашения о совместной борьбе человечества с причинами глобального потепления обязывают страны снижать антропогенные парниковые газы. Именно на сельское хозяйство приходится более половины поступления существующих форм азота (N) в наземные системы. Поэтому данный элемент остается основным объектом исследования, который рассматривается и с точки зрения управления урожайностью сельскохозяйственных культур, и с точки зрения снижения эмиссии азотных форм.

Для уменьшения потерь азота и повышения эффективности использования азотных удобрений требуется подбор технологий, снижающих нитрификацию и аммонификацию учитываются факторы, контролирующие скорость и степень нитрификации в сельскохозяйственных почвах. Подходы к управлению нитрификацией включают те, которые контролируют доступность аммонийного субстрата, и те, которые напрямую ингибируют нитрификаторы.

Стратегии контроля доступности азотного субстрата включают в себя выбор времени внесения удобрений, подбор вида удобрения для медленного высвобождения или с ингибиторами, поддержание непрерывного роста

растений для ассимиляции N и интенсификацию внутреннего цикла N (иммобилизация).

Сельскохозяйственные производители должны учитывать и дорогостоящие, но эффективные стратегии по снижению эмиссии парниковых газов, значительно влияющие на снижение их эмиссии, но не уменьшающие, а еще лучше увеличивающие урожай сельскохозяйственных культур — прямое ингибирование нитрификаторов с помощью синтетических или биологических ингибиторов нитрификации.

Доказано, что коммерческие ингибиторы нитрификации эффективны, но их использование осложняется изменяющимся климатом и требованиями органического управления. Взаимодействие нитрифицирующих организмов с растениями или микробами, продуцирующими биологические ингибиторы нитрификации, является многообещающим подходом, но не достаточно изучены. Климатически оптимизированное сельское хозяйство должно будет тщательно продумать оптимизированные сезонные сроки, чтобы эти стратегии оставались эффективными инструментами управления.

## Список литературы

1. Агаев В. А. Усвоение азота и накопление нитратов в растениях в зависимости от условий азотного питания// Автореф. дисс. канд. биол. наук. Пущино, 1986. 18 с.
2. Агаев В.А. Формирование нитратного фонда растений в зависимости от условий питания//Экологические проблемы накопления нитратов в окружающей среде: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Пущино 1013 октября. 1989. Пущино, 1989. 47 с.
3. Агаев В.А., Семонов В.М., Соколова О.А. Агроэкологические факторы накопления нитратов растениями // Агрехимия. 1989. № 8. С. 124137.
4. Агапов А.С., Шманаева Т.Н., Пышная О.Н. Влияние условий выращивания на содержание нитратов в плодах томата//Вестник с.-х. науки. 1990. №6. С.29-32.
5. Агрехимия. Учебник/В.Г. Минеев, В.Г. Сычев, Г.П. Гамзиков и др.; под ред. В.Г. Минеева. — М.: Изд-во ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. — 854 с.
6. Алмазов В.Н. и др. Некоторые закономерности накопления нитратов в овощах и картофеле. //Научные труды Зап.-Сиб. овощекартофельной селекционно-опытной станции. 1986. Вып. 5. С.53-67.
7. Андрющенко В.К. Нитраты в овощах и пути их снижения. Кишинев, 1983. С.1-60.
8. Барсуков С.С. Содержание нитратов в почве и растениях кукурузы в зависимости от действия ингибитора нитрификации//Агрехимия. 1986. № 12. С.3-6.
9. Белик В.Ф. Физиология огурца// Физиология сельскохозяйственных растений. М.: Изд. МГУ, 1970. С.208-335.
10. Боронин Н.К., Валеева Н.П. и др. Эффективность ингибиторов нитрификации в условиях Нечерноземья // Агрехимия. 1995. №7. С.33.

11. Босс Г.В. Овощные культуры в защищенном грунте. JL: Колос, 1968. 272 с.
12. Брей С.М. Азотный обмен в растениях (пер. с англ.). М.: Агропромиздат, 1986. 200 с.
13. Брызгалов В.А., Советкина В.Е., Савинова Н.И. Овощеводство защищенного грунта. JL: Колос, 1983. 352 с.
14. Булгакова В.М. Влияние нитрификации и медленнодействующих удобрений на урожайность и качество плодов огурца в переходном обороте пятой световой зоны// Автореф. канд. с.-х. наук. Балашиха, 1997.
15. Горелик Л.А., Грицевич Ю.Г., Паевская Н.И. Действие ингибиторов уреазы на гидролиз и эффективность поверхностно внесенной мочевины // Агрохимия. 1983. №3. С.9-15.
16. Кудяров В.Н. Эмиссия закиси азота из почв в условиях применения удобрений (аналитический обзор) // Почвоведение, 2020, № 10. С. 1192–1205.
17. Основы агрономии: учебное пособие/Ю.В. Евтефеев, Г.М. Казанцев. — М.: ФОРУМ, 2013. — 368 с.: ил.
18. Рогозин М.Ю., Бекетова Е. А. Экологические последствия применения пестицидов в сельском хозяйстве // Молодой ученый. 2018. № 25 (211). — С. 39-43.
19. Хаэиев Ф. Х. Ферментативная активность почв. «Наука», 1976.
20. Хецуриани Е.Д, Хецуриани Т.Е. Мероприятия по борьбе с эвтрофикацией водоемов// Приоритетные задачи и стратегии развития сельскохозяйственных наук: Сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф., 25 мая 2016 г. / ФЦНиО ЭВЕНСИС. - Тольятти, 2016. - С. 11-13
21. Ягодин Б. А., Жуков Ю. П., Кобзаренко В. И. Агрохимия / Под редакцией Б. А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
22. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия/Под ред. Б.А. Ягодина. — М.: Колос, 2002. — 584 с.: ил.

23. Artola E., Cruchaga S., Ariz I, Moran J.F., Garnica M., Houdusse F., et al. 2011. Effect of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on urea metabolism and the assimilation of ammonium by *Triticum aestivum* L. *Plant Growth Regul.*, 63 (1): 73–9.
24. Bishop P., Manning M. 2010. Urea volatilisation: the risk management and mitigation strategies. Palmerston North, New Zealand: Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University.
25. Bouwman A.F., Boumans L.J.M., Batjes N.H. 2002. Estimation of global NH<sub>3</sub> volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands. *Global Biogeochem. Cycl.*, 16 (2): 8-14.
26. Cameron K. C., Di H. J., Moir J. L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review // *Annals of Applied Biology*. 2013. 162 (2). – P. 145-173.
27. Chien S.H., Prochnow L.I., Cantarella A.H. 2009. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in agronomy*, 102, 267-322. IFA International Fertilizer Association. Fertilizer outlook 2017–2021.
28. IFA annual conference – 22–24 May 2017 Marrakech (Marocco). Paris: IFA International Fertilizer Association, Services PITaA; 2017 June 2017a.
29. IFA annual conference – 22–24 May 2017 Marrakech (Marocco). Paris: IFA International Fertilizer Association, Services PITaA; 2017 June 2017a.
30. IFA International Fertilizer Association. Short-term fertilizer outlook 2017– 2018 report. Paris: IFA International Fertilizer Association, Services PITaA; 2017 November 2017b.
31. IFA International Fertilizer Association. Short-term fertilizer outlook 2017– 2018 report. Paris: IFA International Fertilizer Association, Services PITaA; 2017 November 2017b.
32. Junejo N., Khanif M.Y., Hanfi M.M., Yunus W.W., Dharejo K.A. 2011. Role of inhibitors and biodegradable material in mitigation of nitrogen losses from fertilized lands. *African Journal of Biotechnology*. 10 (18): 3504-3514.

33. Lasisi A.A., Akinremi O.O., Kumaragamage D. 2019. Efficacy of a new N-(n-butyl) thiophosphoric triamide formulation in reducing ammonia volatilization from urea-based fertilizers. *Canadian Journal of Soil Science*, 99: 1-11.
34. Manunza B., Deiana S., Pintore M., Gessa C. 1999. The binding mechanism of urea, hydroxamic acid and N-(n-butyl)-phosphoric triamide to the urease active site. A comparative molecular dynamics study. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 789–796.
35. Margon A., Parente G., Piantanida M., Cantone P., Leita L. 2015. Novel investigation on ammonium thiosulphate (ATS) as an inhibitor of soil urease and nitrification. *Agricultural Sciences*, 6 (12): 1502.
36. Martins M. R., Sant’Anna S.A.C., Zaman M., Santos R.C., Monteiro R.C., Alves B.J.R., Urquiaga S. 2017. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions, fertilizer-15N recovery and maize yield in a tropical soil. *Agriculture, ecosystems & environment*, 247: 54-62.
37. McCarty G.W., Bremner J.M., Krogmeier M.J. 1990. Evaluation of ammonium thiosulfate as a soil urease inhibitor. *Fertilizer research*. 24 (3): 135-139.
38. Mira A.B., Cantarella H., Souza-Netto G.J.M., Moreira L.A., Kamogawa M.Y., Otto R. 2017. Optimizing urease inhibitor usage to reduce ammonia emission following urea application over crop residues. *Agric. Ecosys. Environ.*, 248:105–12.
39. Prasertsak P., Freney J.R., Denmead O.T., Saffigna P.G., Prove B.G., Reghenzani J.R. 2002. Effect of fertilizer placement on nitrogen loss from sugarcane in tropical queensland. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 62 (3): 229-239.
40. Ramsbacher A. Assessment of the global market for slow and controlled release, stabilized and water-soluble fertilizers. Presentaton at IFA strategic forum. 2017. Paris: IFA – International Fertilizer Association; 2017 November 2017.

41. Rochette P., Angers D.A., Chantigny M.H., Gasser M.O., MacDonald J.D., Pelster D.E., Bertrand N. 2013. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? *Journal of Environmental Quality*, 42 (6): 1635-1642.
42. Schwenke G.D., Manning W., Haigh B.M. 2014. Ammonia volatilisation from nitrogen fertilisers surface-applied to bare fallows, wheat crops and perennial-grass-based pastures on Vertosols. *Soil Research*, 52(8): 805-821.
43. Soares J.R., Cantarella H., de Campos Menegale M.L. 2012. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biology & Biochemistry*, 52: 82-89.
44. Sullivan D.M., Havlin J.L. 1988. Agronomic use of ammonium thiosulfate to improve nitrogen fertilizer efficiency. *Journal of Fertilizer Issues*, 5: 37-44.
45. Sullivan D.M., Havlin, J.L. 1992. Soil and environmental effects on urease inhibition by ammonium thiosulfate. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 950-956.
46. Suter H.C., Pengthamkeerati P., Walker C., Chen D. 2011. Influence of temperature and soil type on inhibition of urea hydrolysis by N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in wheat and pasture soils in south-eastern Australia. *Soil Research*, 49 (4): 315-319.
47. Turner D.A., Edis R.E., Chen D., Freney J.R., Denmead O.T. 2012. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to cereals in two cropping areas of southern Australia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 93(2): 113-126.
48. Yuan Y., R. Wang E. Cooter L. Ran, P. Daggupati, D. Yang R. Srinivasan and A. Jalowska. 2018. Integrating Multi-Media Models to Assess Nitrogen Losses from the Mississippi River Basin to the Gulf of Mexico. *Biogeosciences* 15: 7059-7076
49. Watson C.J. Urease activity and inhibition-principles and practice. 2000. *Proceedings-International Fertiliser Society*. – International Fertiliser Society, 454: 1-40.

50. Watson C.J., Akhonzada N.A., Hamilton J.T.G., Matthews D.I. 2008 Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Use Manag.*, 24: 246–53.

## Приложение А

### Фенология

№	Фенология	Посев	Всходы	1-ый наст. лист	3-ий лист		кущение		выход в трубку												
	Дата				12.06.2023	16.06.2023	18.06.2023	24.06.2023	04.07.2023	12.07.2023	AV	Er	AV	Er	AV	Er					
1	контроль																				
2	КАСпов																				
3	КАС+DMPPпов																				
4	КАС+NBPTпов																				
5	КАС+ATSpов																				
6	КАСвнпочв																				
7	КАС+DMPPвнпочв																				
8	КАС+NBPTвнпочв																				
9	КАС+ATСвнпочв																				
10	DMPPпов																				
11	NBPTпов																				
12	ATSpов																				
13	DMPPвнпочв																				
14	NBPTвнпочв																				
15	ATСвнпочв																				

## Приложение Б

### Количество азота в фильтрате

мг N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в сосуде.

№	Вариант	12.06.2023	19.06.2023	26.06.2023	03.07.2023	10.07.2023
1	Контроль	1,42	1,02	0,87	0,53	0,29
2	КАС <sub>пов</sub>	4,28	3,76	2,38	1,94	0,83
3	КАС+DMPP <sub>пов</sub>	2,27	2,47	1,98	1,82	0,53
4	КАС + NBPT <sub>пов</sub>	2,69	2,78	2,32	1,62	0,43
5	КАС + ATS <sub>пов</sub>	2,16	2,31	2,15	1,62	0,45
6	КАС <sub>вн</sub>	3,78	3,94	2,58	2,37	0,85
7	КАС+DMPP <sub>вн</sub>	2,53	3,36	2,61	1,41	0,42
8	КАС + NBPT <sub>вн</sub>	2,10	2,93	2,18	0,98	0,59
9	КАС + ATS <sub>вн</sub>	2,15	2,08	2,30	1,37	0,46
10	DMPP <sub>пов</sub>	0,56	0,32	0,34	0,41	0,21
11	NBPT <sub>пов</sub>	0,54	0,31	0,24	0,21	0,14
12	ATS <sub>пов</sub>	0,52	0,36	0,31	0,29	0,12
13	DMPP <sub>вн</sub>	0,18	0,38	0,24	0,16	0,09
14	NBPT <sub>вн</sub>	0,17	0,15	0,12	0,09	0,04
15	ATS <sub>вн</sub>	0,19	0,13	0,01	0,08	0,03