

углерода не так значительно, но за счет высокого содержания кальция в ШД смеси отмечено снижение уровня кислотности почвы при добавлении её в почву.

В вегетационных опытах рекомендуемая доза внесения шунгита – не менее 10 г/кг почвы при мелкой фракции помолла.

Литература

1. Бирюкова О.А. О влиянии удобрения ШунгиТерра на физико-химические свойства чернозема обыкновенного // Актуальные агроэкологические проблемы. - 2017. - №6. - С. 36-40.
2. Борисов П.А. О чем говорят камни Карелии. - Петрозаводск: Госиздат Карело-Финской ССР, 1952. - 120 с.
3. Дубровина И.А., Юркевич М.Г., Сидорова В.А. Влияние биоугля и удобрений на развитие растений ячменя и агрохимические показатели дерново-подзолистых почв в вегетационном опыте // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. - 2020. - № 3. - С. 31-44.
4. Ережеева Г.Н., Кряжева Т.В. Свойства и применение шунгита // Труды университета. - 2014. - № 2. - С. 126-128.
5. Кадырова З.Р., Жигунов А.В. Влияние шунгита на всхожесть семян при выращивании контейнеризированных сеянцев ели европейской и сосны обыкновенной / Актуальные вопросы в лесном хозяйстве: материалы III междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, 06-08 ноября 2019 г. - СПб.: Изд-во Полиграф экспресс, 2019. - С. 104-108.
6. Калинин Ю.К. Экологический потенциал шунгита // Шунгиты и безопасность жизнедеятельности человека. Материалы Первой Всероссийской научно-практической конференции. - Петрозаводск, 2007. - С. 5-7.
7. Пыжов В.С., Удовенко А.И., Каменев Р.А. Применение удобрения ШунгиТерра в растениеводстве / Инновации в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур: материалы Всероссийской

научно-практической конференции (Персиановский, 9 февраля 2017 г.). – Персиановский: Донской ГАУ, 2017. - С. 45-49.

8. Сидорова В.А., Юркевич М.Г., Дубровина И.А. Использование шунгита при выращивании лука репчатого (*Allium cepa* L.) на зеленое перо // Агрохимический вестник. – 2021. - № 1. - С. 59-63.
9. Теребова Е.Н., Орешникова Н.В., Павлова М.А., Стародубцева А.А. Использование коры сосны обыкновенной и шунгитовой крошки для выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.) в защищенном грунте // Лесной вестник. - 2024. - Т. 28. - № 2. - С. 55–69.
10. Тимейко Л.В., Кузнецова Л.А., Голубева О.А. К вопросу использования шунгитов в сельскохозяйственном производстве // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования. - Воронеж, 2017. - С. 233–237.
11. Тойкка М.А., Кекконен А.П. Шунгит как удобрение // Ученые записки Карело-финского государственного университета. – 1946. - Т. 1. - С. 214-268.
12. Тохтеева Л.Х., Тохтеева Э.А. Влияние шунгита на посевные качества семян озимой пшеницы // Известия Горского государственного аграрного университета. - 2011. - Т. 48. - № 2. - С. 276-280.
13. Хромушин В.А., Честнова Т.В., Платонов В.В., Хадарцев А.А., Киреев С.С. Шунгиты, как природная нанотехнология (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. - 2014. - №1. - Публикации 3-14. <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2014-1/5039.pdf>
14. Цховребов В.С., Калугин Д.В., Фаизова В.И., Новиков А.А. Применение горных пород в качестве удобрения подсолнечника // Агрохимический вестник. – 2011. - № 4. - С. 14-15.
15. Шибаева Т.Г., Шерудило Е.Г., Первунина А.В., Кирилюк С.Д., Титов А.Ф. К вопросу о влиянии шунгитов на рост и развитие растений // Труды Карельского научного центра РАН. - 2022. - № 7. - С. 13–27.
16. Щипцов В.В., Бурцев И.Н., Жиров Д.В., Волошин А.В., Машин Д.О. Промышленные минералы севера европейской части России // Труды Карельского научного центра РАН. – 2020. - № 6. - С. 7–35.

THE INFLUENCE OF SHUNGITE ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF BARLEY PLANTS AND THE AGROCHEMICAL PROPERTIES OF SOD-PODZOLIC SOIL UNDER GROWING SEASON CONDITIONS

V.A. Sidorova, Ph.D.

Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IB KarRC RAS)

185910, Russia, Petrozavodsk, Pushkinskaya Str., 11

E-mail: val.sidorova@gmail.com

The influence of shungite on the growth and development of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) and on the basic agrochemical properties of agro-soddy-podzolic soil was studied. Shungite fractions of 0.5 mm and 2–4 mm and a shungite-dolomite mixture at a dosage of 5 and 10 g/kg of soil were used. Additionally, we investigated the option of pre-soaking the seeds in a shungite extract. As a result of the experiment, no negative effects of shungite on plants were revealed. Adding shungite at a dose of 5 g/kg does not lead to significant changes in plant growth indicators. Addition at a dose of 10 g/kg leads to an increase in plant height and underground biomass, but does not lead to a significant increase in above-ground biomass. The best results were obtained for the option with preliminary soaking of seeds in an aqueous extract of shungite. The introduction of shungite into the soil led to an increase in the content of carbon and available potassium, but did not change the content of available phosphorus and nitrogen. The soil acidity level changes only in the variant with the addition of a shungite-dolomite mixture.

Key words: shungite, growing season, agro-soddy-podzolic soil, agrochemical properties.

УДК 631.58:005.3

DOI: 10.25680/S19948603.2025.142.15

МИГРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НИТРАТНОГО АЗОТА ЗА ПРЕДЕЛЫ КОРНЕОБИТАЕМОГО СЛОЯ ПРИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОМ ВНЕСЕНИИ УДОБРЕНИЙ

Н.В. Абрамов, С.А. Семизоров, ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»,

625003, г. Тюмень, ул. Республики, д.7, E-mail: abramovnv@gausz.ru

7 (908) 874-02-50

Проведены исследования в длительных стационарах и научно-производственных опытах в период с 1984 по 2023 г. Доказано, что на снижение темпов миграции азота в нитратной форме влияли севообороты с многолетними травами и промежуточными культурами. Интенсивность его передвижения за пределы корнеобитаемого слоя вызвана увеличением дозы азотных удобрений, нормы атмосферных осадков в период вегетации культурных растений. Современные технологии прецизионного земледелия обеспечивали точное внесение удобрений по элементарным участкам с учётом содержания N-NO₃, оптимизировали минеральное питание агроценозов и снижали

интенсивность миграционных процессов нитратного азота. Дифференцированное внесение аммиачной селитры с использованием систем спутниковой навигации позволило увеличить продуктивность яровой пшеницы, получить самое дешёвое зерно и повысить рентабельность его производства на 17%.

Ключевые слова: экология, цифровые технологии, точное земледелие, миграция нитратного азота, оптимизация минерального питания, яровая пшеница, чернозём выщелоченный, дифференцированное внесение удобрений.

Для цитирования: *Абрамов Н.В., Семизоров С.А. Миграционные процессы нитратного азота за пределы корнеобитаемого слоя при дифференцированном внесении удобрений// Плодородие. – 2025. - №1. – С. 66-72. DOI: 10.25680/S19948603.2025.142.15.*

Интенсивная антропогенная трансформация природных систем может привести к обострению экологических проблем в аграрном секторе. Энергонасыщенная техника, необоснованные дозы минеральных удобрений, их несовершенная технология внесения приводят к деградации почвенного плодородия: дисбалансу элементов питания, снижению содержания гумуса, переуплотнению почвы, разрушению её структуры, затуханию микробиологических процессов [1, 14, 19].

Известно, что каждая сельскохозяйственная культура требует своих определённых условий возделывания, в том числе почвенных. Соответственно плодородие почвы должно регулироваться по принципу последовательного устранения факторов, ограничивающих возделывание культур, т.е. исполняя закон минимума. Эта задача должна решаться в процессе выполнения агротехнологии одновременно с регулированием продукционного процесса растений в агроценозах [4, 9, 16]. Минеральные удобрения в сельском хозяйстве способствуют увеличению содержания в почве элементов питания для повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Однако часто их вносят в количестве, не сбалансированном с потребностью агроценозов, поэтому они становятся источником загрязнения почвы, сельскохозяйственной продукции, водоёмов, грунтовых вод, атмосферы, т. е. окружающей среды [5, 7, 13].

Актуальность вопроса передвижения нитратного азота по профилю почвы повышается для хозяйств, технология возделывания сельскохозяйственных культур у которых разработана на основе применения высоких доз минеральных удобрений [18]. Наблюдения за миграцией нитратов на чернозёмных почвах в ранее проведённых исследованиях ограничивались глубиной 100-200 см, фиксируя его потери из корнеобитаемого слоя. Наша задача не только ответить на вопрос о количественных потерях азота в нитратной форме из корнеобитаемого слоя, но и проследить за вероятностью попадания его в грунтовые воды. Это связано с тем, что большие потери азота происходят за счёт миграции на глубину 5-8 м [23]. Согласно наблюдениям, грунтовые воды в Западной Сибири у чернозёмов залегают на глубине 5 м и более [8]. Известно, что корневая система яровой пшеницы на 99% расположена в метровом слое, поэтому в исследованиях потерянными считали азот, обнаруженный ниже 100 см.

Вместе с тем цифровизация – новый вектор развития агропромышленного комплекса, требует системности и всесторонней оценки происходящих процессов в агроэкосистемах, в том числе и экологической [10, 20, 22].

Цель исследования - изучить миграционные процессы азота за пределы корнеобитаемого слоя яровой

пшеницы в системе точного земледелия Западной Сибири.

В задачу исследований входило:

- проследить характер передвижения нитратного азота до глубины 5 м чернозёма выщелоченного при различной интенсивности использования пашни;
- изучить динамику азота в нитратной форме при дифференцированном внесении минеральных удобрений с использованием систем спутниковой навигации;
- установить интенсивность потерь азота нитратов при различных способах внесения минеральных удобрений;
- дать агрономическую оценку технологии точного земледелия для решения экологических вопросов.

Методика. Изучение миграционных процессов нитратного азота проводили в длительном стационарном опыте. В 1984 г. образцы почвы отбирались до глубины 3 м с интервалом 10 см в завершающем поле зернопаропропашного и зернопропашного севооборотов. Агрохимический анализ проведён в лаборатории круговорота веществ в агроценозах СибНИИЗХима (г. Новосибирск). Во второй ротации пяти севооборотов, бессеменной пшеницы и залежи почвенные образцы в 1989 г. отбирали также через 10 см до глубины 5 м и анализировали в агрохимической лаборатории Тюменского СХИ. В период первой ротации минеральные удобрения вносили из расчёта на планируемую урожайность зерновых 3,0 т/га, а во второй – 4,0 т/га с учётом содержания элементов питания в выщелоченном чернозёме и коэффициента их использования.

Методология проведённых исследований основана на анализе экологической ситуации в агроландшафтах. Инновационные технологии точного земледелия базировались на использовании систем спутниковой навигации, программном обеспечении соответствующих опций. Они предусматривают: оцифровку опытного поля и элементарных участков (повторностей) с привязкой к географическим координатам; отбор почвенных проб по повторностям с фиксацией точек ручным навигатором Garmin GPS MAP 629; агрохимический анализ по общепринятым методикам и ГОСТам; составление карты задания с индивидуальной нормой по повторностям опыта; экспорт в бортовой навигационный компьютер; калибровку дозы внесения удобрений; дифференцированное внесение удобрений с использованием систем спутниковой навигации на планируемую урожайность яровой пшеницы; параллельное вождение агрегата по курсору в БНК.

Исследования проводили на опытном поле и на производственных полях учебно-опытного хозяйства ГАУ Северного Зауралья с 1977 г. Почва – выщелоченный

чернозём, содержание гумуса 7,21-7,91%, азота по Кьельдалю – 0,39-0,42, общего фосфора – 0,15 – 0,20%, pH водной вытяжки 5,7 – 6,4 ед. Водно-физические параметры благоприятны для роста и развития культур: по плотности сложения в слое 0-30 см почва оценивается как рыхло-плотная (1,08-1,16 г/см³), общая пористость 54,0-55,8%, наименьшая влагоёмкость 31,4-35,6% (36,4-39,3 мм).

Климат северной лесостепи Западной Сибири резко-континентальный с суммой активных температур 1700-1900°C, суммой осадков за год 350-404 мм и за вегетационный период 224 мм при гидротермическом коэффициенте Селянинова (ГТК) 1,2-1,3. Зима холодная, умеренно-снежная. Безморозный период 100-120 сут. Периодически (раз в 3-4 года) полевой сезон с дефицитом атмосферных осадков. Длительный период эксперимента (46 лет) охватывал всё разнообразие погодных условий.

Результаты и их обсуждение. Связь между различными структурными единицами биосферы, биогеоценозов и почвой осуществляется через биогеохимические круговороты, представляющие собой систему согласованных в пространстве и во времени трансформационных и миграционных потоков веществ, имеющих циклический характер [6, 11, 15]. К базисным компонентам химизации земледелия относится азот, поэтому важны изучение и контроль круговорота его, особенно в антропогенных экосистемах, так как увеличение содержания азота приводит к химическому загрязнению почв [5, 17].

Исследования показали, что при более интенсивном использовании пашни в зернопропашном севообороте культурные растения быстрее ассимилировали из почвы подвижные формы нитратного азота, предотвращая их вымывание в нижние слои. Так, после первой ротации зернопропашного севооборота содержание нитратного азота в слое почвы 0-300 см составило 74 кг/га, а в зернопаропропашном – 191 кг/га (табл.1).

1. Содержание и распределение по профилю почвы нитратного азота в севооборотах, бессменной пшенице и залежи (северная лесостепь, чернозём выщелоченный), кг/кг

Глубина слоя почвы, см	Завершение первой ротации, (1984 г.)		Завершение второй ротации (1989 г.)						
	Вид севооборота								
	Зерно-паропропашной	Зерно-пропашной	Зерно-паропропашной	Зерно-пропашной	Плодосменный	Зернотравяно-пропашной	Кормовой плодосменный	Бессменная пшеница	Залежь
0-50	29	19	47	35	27	32	40	26	15
51-100	21	12	24	17	6	15	10	17	11
101-200	74	21	89	41	17	6	18	44	6
201-300	67	22	86	33	22	5	6	27	2
301-400	-	-	44	15	20	4	0	25	0
401-500	-	-	22	11	12	0	0	19	0
101-300	141	43	175	74	39	11	24	71	8
101-500	-	-	241	100	71	15	24	115	8

При этом в слой почвы 101-300 см зернопропашного севооборота мигрировало N-NO₃ в 3,3 раза меньше, чем в севообороте с чёрным паром.

Нами был взят условно метровый слой почвы возможного потребления азота культурными растениями. Следовательно, потери нитратного азота в зернопаропропашном севообороте составили 141 кг/га, а в зернопропашном – 43 кг/га. Это объясняется более интенсивным накоплением нитратного азота в пахотном слое парового поля до 18 мг/кг почвы (высокий уровень обеспеченности зерновых). В это же время в конце вегетационного периода после гороха с овсом на сенаж (занятый пар) N-NO₃ накапливалось в 2 раза меньше – 9 мг/кг (низкий уровень обеспеченности). Накопление же продуктивной влаги в поле чистого пара достигало 146 мм в метровом слое, что выше на 22 мм, чем после занятого пара. Это способствовало передвижению нитратного азота в нижние слои почвенного профиля.

С начала второй ротации изучаемых севооборотов уровень внесения азотных удобрений был увеличен до 90 кг д.в/га. В тот период исследований внесение усреднённой дозы по повторностям и даже вариантам опыта считалось общепринятой схемой применения удобрений, что объяснялось соблюдением принципа единственного различия в проведении опыта. Установлено, что в завершающем поле после второй ротации севооборотов увеличивалось количество неиспользованного N-NO₃ за пределами корнеобитаемого слоя. Так, в севообороте с чистым паром в слое 101-300 см его содержание достигало 175 кг/га, т.е. было на 34 кг/га больше по сравнению с первой ротацией, где азотных удобрений вносилось 60 кг д.в/га. Здесь же прослеживалась миграция нитратного азота в более глубокие слои 301-400 и 401-500 см - 44 и 22 кг/га соответственно, а общие потери его составили в слое 101-500 см 241 кг/га. Подобная закономерность прослеживалась и в зернопропашном севообороте, но с меньшей интенсивностью. Замена чистого пара на занятый приводила к более полному потреблению азота из удобрений, полученного за счёт свободно живущих азотфиксирующих бактерий, а также высвободившегося при трансформации органического вещества. В слое 101-300 см его накапливалось меньше на 35 кг/га, а в слое 301-500 см – на 29 кг/га. Это показывает, что серьёзное нарушение в биохимических циклах питательных веществ вызывают не только уровень используемых удобрений, но и структура посевных площадей в севообороте. Введение донника и клевера в плодосменном севообороте снижало потери нитратного азота за пределы корнеобитаемого слоя на 29 кг/га относительно зернопропашного и на 170 кг/га – зернопаропропашного севооборота. В зернотравянопропашном севообороте с двухлетним использованием клевера в слое 101-400 см отмечено только 15 кг/га N-NO₃, а в слое 401-500 см нитратный азот вообще не обнаружен.

Заслуживает внимания кормовой плодосменный севооборот интенсивного типа с использованием подсеваемых культур, благодаря которым в поле озимой ржи с весенним высеванием гороха и зерновых получено три урожая зелёной массы за один вегетационный период. Такое повышение коэффициента использования пашни

позволило предотвратить перемещение нитратного азота в слой 301-500 см. Зернотравянопропашной и кормовой плодосменными севооборотами были близки по степени миграционных процессов нитратного азота, протекающих в естественных условиях залежи. Здесь потери нитратов зафиксированы в слое 101-300 см.

Вызывают опасения потери нитратного азота в условиях узкой зерновой специализации хозяйств. На практике это, как правило, зернопаровые севообороты. Негативное влияние чистого пара на передвижение вниз по профилю $N-NO_3$ показано выше. Однако при 100%-ной занятости пашни яровой пшеницей в 12-летних бессменных посевах потери азота за пределы корнеобитаемого слоя 101-500 см составили 115 кг/га. В 10-сантиметровых слоях этой толщи содержание нитратного азота было всего 1,5–2,7 мг/кг почвы, т.е., согласно общепринятой градации, – очень низкое, но только в двухметровой толще (101-300 см) потери нитратов достигали 71 кг/га, а в слое 301-500 см – 44 кг/га.

В геохимическом профиле выщелоченного чернозёма прослеживалось уменьшение содержания нитратного азота с глубиной, однако во всех вариантах опыта он зафиксирован за пределами 1 м. Данное положение миграционных процессов $N-NO_3$ усугубляется тем, что вероятность попадания нитратов в грунтовые воды высокая, так как они у чернозёма выщелоченного находятся на глубине 5 м и ниже [12]. Наличие нитратного азота в нижних слоях профиля почвы 100-300 и 300-500 см имело среднюю положительную тесноту связи с влажностью почвы верхнего метрового слоя ($r = 0,46 \pm 0,09$).

Биохимические циклы трансформационных и миграционных процессов в системе точного земледелия практически не изучены. Вместе с тем, научная концепция цифровизации технологии возделывания сельскохозяйственных культур основана на неоднородности внутрипольного почвенного плодородия. Использование систем спутниковой навигации в технологическом процессе внесения удобрений позволяет перераспределять дозы удобрений по микроучасткам поля в зависимости от содержания элементов питания [2, 3, 21]. Результаты исследований показали, что содержание нитратного азота перед посевом яровой пшеницы до внесения удобрений колебалось по вариантам опыта от 6,0 до 8,7 мг/кг почвы в слое 0-30 см и соответствовало низкому уровню его запасов. Даже при таком малом содержании $N-NO_3$ пространственная его вариабельность по повторностям опыта (элементарным участкам) составляла 32-35% (табл.2).

Внесение аммиачной селитры из расчёта на планируемую урожайность яровой пшеницы 3 т/га традиционным способом увеличивало урожайность $N-NO_3$ к фазе всходов до очень высокого уровня. При этом колебания нитратного азота по повторностям достигали 12 мг/кг, что явилось причиной роста внутрипольной пространственной вариабельности его. В варианте без применения минеральных удобрений к фазе всходов яровой пшеницы содержание нитратного азота увеличивалось за счёт свободно живущих азотфиксирующих бактерий до 9 мг/кг почвы с сохранением его вариабельности на уровне допосевого периода.

2. Содержание нитратного азота (мг/кг почвы) и его пространственная вариабельность (%) в слое 0-30 см (среднее за 6 лет)

Вариант опыта		Перед посевом*	Всходы	Кущение	Уборка
Без удобрений (контроль)	Содержание $N-NO_3$	6,0	9,0	7,7	5,8
	Вариабельность	33	33	26	35
Традиционный способ внесения аммиачной селитры	Содержание $N-NO_3$	8,7	25,3	19,3	7,7
	Вариабельность	35	47	52	39
Дифференцированный способ внесения аммиачной селитры	Содержание $N-NO_3$	6,3	27,0	20,7	6,0
	Вариабельность	32	26	19	33
НСР ₀₅ для содержания $N-NO_3$		2,7	8,4	5,6	1,2

*До внесения аммиачной селитры.

Дифференцированное внесение аммиачной селитры с использованием систем спутниковой навигации (GPS, Глонасс) по элементарным участкам, согласно карте задания, позволило увеличить содержание $N-NO_3$ также до высокой обеспеченности, но снизить пространственную вариабельность на 6% относительно допосевого периода. Положительная динамика создания моногамного слоя почвы по плодородию объясняется техническим решением вносить точную дозу удобрений с учётом содержания азота нитратов по повторностям данного варианта. Закономерность снижения пространственной внутрипольной вариабельности до 10% здесь отмечена и в фазе кущения яровой пшеницы при снижении содержания нитратного азота. Относительно традиционного способа внесения удобрений, пространственная вариабельность нитратного азота в этой фазе яровой пшеницы снижалась по сравнению с контрольным вариантом на 7%.

По завершении вегетации яровой пшеницы в результате потребления культурными растениями содержание нитратного азота снижалось до низкой степени обеспеченности 5,8-7,7 мг/кг почвы, т.е. возвратилось к исходному состоянию допосевого периода. Вариабельность $N-NO_3$ по элементарным участкам также приближалась к изначальному уровню 33-39%. Это показывает, что для оптимизации азотного питания требуется ежегодное пространственно-дифференцированное внесение минеральных удобрений. Вместе с тем, динамика содержания нитратов по годам исследований (в течение 6 лет) показала, что в варианте с дифференцированным внесением аммиачной селитры происходило постепенное снижение пространственной вариабельности нитратного азота. Хотя ежегодное снижение вариабельности нитратов математически не подтверждалось ($F_{\phi} < F_T$), но за 6 лет она снизилась на 11% в весенний период до внесения удобрений.

Таким образом, применение азотных удобрений по элементарным участкам с учётом содержания элементов питания приводило к оптимизации минерального питания яровой пшеницы, сглаживая пространственные колебания $N-NO_3$ в почве. Обеспечивая равноценные агрохимические свойства в агроценозах, индивидуальные дозы удобрений по микроучасткам поля снижали их экологическую нагрузку. В среднем за годы исследований

практически при одинаковой дозе внесения аммиачной селитры 45 кг д.в/га, дифференцированное применение её по повторностям опыта снижало миграцию N-NO₃ в слой 101-200 см на 17,5 кг/га относительно традиционного способа внесения (табл.3).

3. Распределение нитратного азота по профилю чернозёма выщелоченного в зависимости от способа внесения аммиачной селитры, кг/га (среднее за 2018-2023 г.).

Слой почвы, см	Без удобрений (контроль)	Традиционный способ внесения удобрений на планируемую урожайность 3 т/га	Дифференцированный способ внесения удобрений на планируемую урожайность		НСР ₀₅
			3 т/га	4 т/га	
0-50	22,6	30,6	23,4	31,2	5,7
51-100	20,6	36,3	29,4	31,4	3,4
101-150	8,4	25,2	19,6	23,8	1,6
151-200	7,7	22,4	10,5	21,0	2,7
101-200	16,1	47,6	30,1	44,8	

Использование усреднённой дозы по элементарным участкам вызвало более интенсивную мобильность нитратного азота в нижние слои почвенного профиля. Так, в слое чернозёма выщелоченного 101-150 см нитратного азота было 25,2 кг/га, в варианте дифференцированного внесения аммиачной селитры – 19,6, а без применения удобрений – 8,4 кг/га. Аналогичная закономерность потерь нитратного азота установлена и в слое 151-200 см, здесь зафиксировано 22,4 кг/га N-NO₃, что выше его содержания в варианте с дифференцированным внесением и без применения минеральных удобрений в 2,1 и 2,9 раза соответственно.

Важной составляющей интенсивности миграционных процессов азота нитратов был уровень дозы внесения аммиачной селитры. Увеличение её до 94 кг д.в/га на планируемую урожайность яровой пшеницы 4 т/га при дифференцированном способе внесения привело к росту потерь нитратного азота в слое 101-150 см на 4,2 кг/га, а в слое 151-200 см – на 10,5 кг/га (в 2 раза) относительно аналогичного варианта с дифференцированным внесением удобрений, но на планируемую урожайность 3 т/га. Данный уровень содержания азота в нитратной форме по слоям составлял 23,8 и 21,0 кг/га, а в толще 101-200 см – 44,8 кг/га был даже ниже варианта с традиционным способом внесения с дозой удобрений на планируемый урожай 3 т/га.

Интенсивность передвижения нитратного азота вниз по профилю почвы зависела и от количества атмосферных осадков, выпавших в летний период, что связано с химической природой N-NO₃ и процессом передвижения воды в почве. В благоприятный по увлажнению 2019 г. с суммой осадков за вегетационный период яровой пшеницы 324 мм и гидротермическим коэффициентом 1,49 в варианте дифференцированного внесения удобрений N-NO₃ обнаружено в слое 101-200 см на 16,2 кг/га больше, чем в острозасушливом 2021 г. с ГТК 0,38 и отсутствием осадков в июне и июле. В варианте с усреднённой дозой аммиачной селитры по элементарным участкам эта разница составляла 21,8 кг/га. Следует отметить, что снижение темпа концентрации нитратного азота за пределами корнеобитаемого слоя в условиях

недостаточного увлажнения происходило в основном в толще 101-150 см, т.е. на убыль содержания N-NO₃ из 16,2 кг/га приходилось при дифференцированном способе внесения удобрений 72%, а при традиционном из 21,8 кг/га – 67%.

Рассматривая чернозём, выщелоченный по вертикальной экспозиции, отметим, что основная концентрация нитратов 22,6-31,2 кг/га сосредоточена в слое 0-30 см, занимающем транзитно-аккумулятивное положение в геохимическом профиле почвы. В среднем за годы исследований содержание N-NO₃ после уборки яровой пшеницы колебалось по вариантам опыта от 5,8 до 8,0 мг/кг почвы и соответствовало низкой обеспеченности для зерновых. При этом, как отмечалось ранее, колебания его по элементарным участкам достигали 39%. За пределами органогенного слоя (31-200 см) наблюдалось постепенное снижение азота в нитратной форме: в корнеобитаемом слое 31-100 см в варианте без удобрений до 2,1 мг/кг почвы, а в вариантах с использованием удобрений – до 3,0 – 3,7 мг/кг. В слоях 101-150 и 151-200 см содержание азота нитратов продолжило снижаться – до 1,2-3,6 и 1,1-3,2 мг/кг почвы соответственно.

В интервале шестилетнего цикла наблюдений установлено, что в агроценозах без применения минеральных удобрений 27,2% азота в нитратной форме мигрировало за пределы корнеобитаемого слоя 101-200 см. Внесение аммиачной селитры усредненной дозой по элементарным участкам из расчёта на планируемый урожай яровой пшеницы 3 т/га (45 кг д.в/га) увеличивало эти потери до 41,8% от общей суммы нитратного азота в двухметровой толще, а при дифференцированном способе внесения до 36,3%. Из этого следует, что дифференцированное внесение удобрений с использованием систем спутниковой навигации в режиме off-line, оптимизируя режим азотного питания, дало возможность сократить потери нитратного азота на 17,5 кг/га (5,5%) относительно традиционного способа внесения удобрений.

Дифференцированное внесение минеральных удобрений в режиме off-line, решая экологические проблемы, связанные с миграцией нитратного азота за пределы корнеобитаемого слоя, благотворно влияло на оптимизацию минерального питания яровой пшеницы и как результат – на её продуктивность. В среднем за годы исследований урожайность яровой пшеницы при традиционном способе внесения удобрений получена 2,97 т/га, а при дифференцированном – 3,40 т/га (табл.4).

Распределение азотных удобрений по элементарным участкам поля с учётом содержания нитратного азота в чернозёме выщелоченном обеспечило выравнивание плодородия почвы в пространстве, формируя равнозначный режим питания культурных растений, увеличивая урожайность яровой пшеницы на 0,43 т/га по сравнению с вариантом традиционного способа внесения. При использовании индивидуальных доз минеральных удобрений, согласно картам заданий на планируемую урожайность 3 т/га, получено самое дешёвое зерно яровой пшеницы – 7 778 руб/т с наибольшей рентабельностью его производства – 54%. Если расценивать миграцию нитратного азота 17,5 кг д.в/га за пределы корнеобитаемого слоя (101-200 см) как безвозвратные потери, то

товаропроизводитель, используя дифференцированный способ внесения удобрений в системе точного земледелия, приобретая аммиачную селитру по цене 25 тыс. руб/т, получит дополнительно чистой прибыли 1 274 руб/га (11,7%)

4. Урожайность яровой пшеницы и экономическая эффективность дифференцированного способа внесения аммиачной селитры (среднее за 2018-2023 г.)

Вариант	Урожайность, т/га	Затраты на производство, руб/га	Прибыль, руб/га	Себестоимость зерна, руб/т	Рентабельность производства, %
Без удобрений (контроль)	1,91	20 753	2 167	10 866	10,0
Традиционный способ внесения удобрений на планируемую урожайность 3 т/га	2,97	25 992	9 648	8 751	37,0
Дифференцированный способ внесения удобрений на планируемую урожайность: 3 т/га	3,40	26 446	14 354	7 778	54,0
4 т/га	3,75	32 645	12 355	8 705	39,0
НСР ₀₅	0,32				

Выводы. Таким образом введение в севообороты многолетних трав, промежуточных культур снижает потери азота в нитратной форме за пределы корнеобитаемого слоя (101-500 см) до 170-226 кг/га по сравнению с севооборотом с чистым паром при уровне внесения азотных удобрений 90 кг д.в/га. Дифференцированное внесение минеральных удобрений в дозе из расчёта на планируемую урожайность яровой пшеницы 3 т/га снижало пространственную вариабельность N-NO₃ к фазе всходов на 6%, к фазе кущения – на 13% относительно предпосевного периода до внесения удобрений. Традиционный способ внесения удобрений с усреднённой дозой по элементарным участкам приводил к увеличению пространственной вариабельности содержания нитратного азота относительно дифференцированного способа внесения в фазе всходов на 21%, а к фазе кущения – на 33%. Обеспечивая равноценные агрохимические свойства чернозёма выщелоченного дифференцированное распределение аммиачной селитры по полю (45 кг д.в/га) снижало потери нитратов за пределы корнеобитаемого слоя (101-200 см) на 17,5 кг/га относительно традиционного способа внесения. Повышение дозы азотных удобрений до 94 кг д.в/га на планируемую урожайность яровой пшеницы 4 т/га увеличивало интенсивность передвижения азота вниз по профилю почвы на глубину 101-200 см до 44,8 кг/га. Это выше варианта дифференцированного внесения удобрений на планируемую урожайность 3 т/га на 14,7 кг/га, но практически с равными потерями как при традиционном способе внесения.

Снижение потерь азота нитратов, оптимизация минерального питания культурных растений по микроучасткам поля дали возможность получить прибавку урожая яровой пшеницы 0,43 т/га по сравнению с традиционным способом внесения удобрений. Индивидуальные дозы минеральных удобрений по элементарным участкам снижали себестоимость зерна до 7 778 руб/т и

увеличивали прибыль от его реализации на 4 706 руб/га, а рентабельность производства – на 17%.

Литература

1. Абрамов Н.В., Гунгер М.В., Козлова М.В. Экологические основы системы точного земледелия // Проблемы агроэкологии АПК Сибири / Сборник трудов Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. - Тюмень, 2023. - С. 97-101.
2. Альберт М.А., Галеев Р.Р., Ковалёв Е.А. Совершенствование технологии дифференцированного внесения удобрений в лесостепи Новосибирского Приобья // Вестник НГАУ. - 2022. - №2. - С. 4-10.
3. Астахов В.С. О разработке машин для дифференцированного внесения твёрдых минеральных удобрений с высоким качеством / В.С. Астахов, С.В. Курзенков, Г.О. Иванчиков // Вестник БГСХА – Горки - 2023. - №1. - С. 143-146.
4. Борисов В.А., Васючков И.Ю., Успенская О.Н. Комплексная оценка различных систем удобрения в экологическом овощеводстве открытого грунта // Агрохимия. - 2022. - №1. - С. 32-38.
5. Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах / Г.П. Гамзиков. - Новосибирск, 2013. - 790 с.
6. Завалин А.А. Экология азотфиксации / А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. - М.: РАН, 2019. - 252 с.
7. Иванчик В.А., Афанасьев Р.А. Продуктивность яровой пшеницы в условиях центрального Нечернозёмья под влиянием минеральных удобрений // Плодородие. - 2020. - №2. - С. 20-23.
8. Каретин Л.Н. Земельные ресурсы южной части Тюменской области и перспективы их сельскохозяйственного использования // Земельные ресурсы Сибири. - 1974. - С. 46-62.
9. Кирюшин В.И. Экологизация земледелия и технологическая политика. - М.: Изд-во МСХА, 2000. - 474 с.
10. Лигман Г.И. Точное земледелие // Г.И. Лигман, И.Г. Смирнов, А.А. Лигман, А.И. Беленков // Нивы России. - 2017. - №10 (154). - С. 40-45.
11. Минеев В.Г. Химизация земледелия и природная среда. - М.: ВО Агропромиздат, 1990. - 287 с.
12. Муромцев Н.А. и др. Закономерности дефицита почвенной влаги предкавказского чернозема под зерновыми культурами армавирского опытного участка Почвенного института РАН. // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. - 2019. - №5. - С. 5-19.
13. Подрезов П.И., Мязин Н.Г., Кожокина А.Н. Влияние многолетнего внесения удобрений на урожайность и качество урожая сахарной свёклы, выращиваемой на чернозёме типичном // Вестник Воронежского ГАУ. - 2021. - Т. 14. - №4(71). - С. 49-57. doi: 10.53914/issn2071-2243-2021-4-49.
14. Постников П.А., Попова В.В. Миграция минерального азота в дерново-подзолистой почве (лизиметрический опыт) // Плодородие. - 2019. - №1. - С. 26-28.
15. Тютонов С.И., Навольнева Е.В., Навольнев В.В., Логвинов И.В., Литвинов А.И. Влияние основных факторов системы воспроизводства плодородия почв на содержание подвижного калия в чернозёме типичном юго-западной части ЦЧР // Земледелие. - 2023. - №2. - С. 8-12. doi:10.24412/0044-3913-2023-2-8-12.
16. Филиппова Л.С. Круговорот азота и его соединений в почве / Л.С. Филиппова // Международный научно-исследовательский журнал. - 2023. - №8 (134). <https://research-journal.org/archive/8-134-2023august/10.23670/IRJ.2023.134.37>. doi: 10.23670/IRJ.2023.134.37
17. Фоменко Т.Г. и др. Миграция биогенных элементов в чернозёме типичном при фертигации плодовых насаждений / Т.Г. Фоменко, В.П. Топова, Е.А. Черников, и др. // Агрохимия. - 2021. - №3. - С. 60-70.
18. Экологические аспекты сельского хозяйства: влияние, загрязнение, устойчивость // Научные статьи. Ру – Дата последнего обновления статьи: 03.12.2023. - <https://nauchniestati.ru/spravka/ekologicheskie-aspekty-selskogo-hozyajstva/> (дата обращения 4.02.2024).
19. Якушев В.П. Информационное обеспечение точного земледелия / В.П. Якушев, В.В. Якушев. - СПб.: Издательство ПЦЯФ РАН, 2007. - 382 с.
20. Якушев В.П., Матвиенко Д.А., Петрушин А.Ф. и др. Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам посевов для точного земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. - 2020. - №2. - С. 4-10.
21. Abramov N.V. Digitization of agricultural land using an unmanned aerial vehicle // Abramov N.V., Semizorov S.A., Sherstobitov S.V., Ginger M.V., Petukhov D.A. / International Scientific Conference: Agritech-III-2020. Pg. 32002.

22. Campbell C.A., Lenter R.P., R de Jond. Effect of dropping summer follow and fertilizers nitrogen nitric nitrogen logt by laching on brown chernozmic loam. G of soil sci. 2004. T. 64. №1. P. 61-64.
23. Liu S. A critical review of central role of microbial regulation in the nitrogen biogeochemical process: New insights for controlling groundwater

nitrogen contamination / S. Liu, T. Zheng, Y.Li.X Zheng // Journal of Environmental Management. – 2023. Vol. 328. – doi: [10.1016/j.jenvman.2022.116959](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116959). 116959 (дата обращения 23.02.2024).

MIGRATION PROCESSES OF NITRATE NITROGEN BEYOND THE ROOT LAYER IN A PRECISION FARMING SYSTEM

N.V. Abramov, Doctor of Agricultural Sciences, S.A. Semizorov, Candidate of Agricultural Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Northern Trans-Urals State Agrarian University”, 625003, Tyumen, Respubliki St., 7, E-mail: abramovnv@gausz.ru 7 (908) 874-02-50

The studies were conducted in long-term hospitals and research and production experiments covering the period from 1984 to 2023. It has been proven that crop rotations with perennial grasses and intercrops reduced the rate of migration of nitrogen in nitrate form. The intensity of its movement beyond the root layer is caused by an increase in the rate of nitrogen fertilizers and atmospheric precipitation during the growing season of cultivated plants. Modern technologies of precision farming ensured precise application of fertilizers in elementary areas, taking into account the N-NO₃ content, optimized the mineral nutrition of agrocenoses and reduced the intensity of migration processes of nitrate nitrogen. Differential application of ammonium nitrate using satellite navigation systems made it possible to increase the productivity of spring wheat, obtain the cheapest grain and increase the profitability of its production by 17%.

Key words: ecology, digital technologies, precision farming, migration of nitrate nitrogen, optimization of mineral nutrition, spring wheat, leached chernozem, differentiated fertilization.

References

1. Abramov N.V., Gunger M.V., Kozlova M.V. Ehkologicheskie osnovy sistemy tochnogo zemledeliya // Problemy agroekologii APK Sibiri / Sbornik trudov Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii. Tyumen', 2023. S. 97-101.
2. Al'bert M.A., Galeev R.R., Kovalev E.A. Sovershenstvovanie tekhnologii differentsirovannogo vneseniya udobrenii v lesostepi Novosibirskogo Priob'ya / Vestnik NGAU. 2022. №2. S. 4-10.
3. Astakhov V.S. O razrabotke mashin dlya differentsirovannogo vneseniya tverdykh mineral'nykh udobrenii s vysokim kachestvom / V.S. Astakhov, S.V. Kurzenkov, G.O. Ivanchikov // Vestnik BGSKHA – Gorki: 2023. №1. S. 143-146.
4. Borisov V.A., Vasyuchkov I.YU., Uspenskaya O.N. Kompleksnaya otsenka razlichnykh sistem udobreniya v ehkologicheskom ovoshchevodstva ot-krytogo grunta / Agrokhiimiya. 2022. №1. S. 32-38.
5. Gamzikov G.P. Agrokhiimiya azota v agrotsenozakh / G.P. Gamzikov // Novosibirsk. 2013. 790 s.
6. Zavalin A.A. Ehkologiya azotifikatsii / A.A. Zavalin, O.A. Sokolov, N.YA. Shmyreva. – M.: RAN, 2019. – 252 s.
7. Ivanchik V.A., Afanas'ev R.A. Produktivnost' yarovoi pshenitsy v usloviyakh tsentral'nogo nechernozem'ya pod vliyaniem mineral'nykh udobrenii / Plodorodie. 2020. №2. S. 20-23.
8. Karetn L.N. Zemel'nye resursy yuzhnoi chasti Tyumenskoi oblasti i perspektivy ikh sel'skokhozyaistvennogo ispol'zovaniya // Zemel'nye resursy Sibiri / Novosibirsk. 1974. S. 46-62.
9. Kiryushin V.I. Ehkologizatsiya zemledeliya i tekhnologicheskaya politika. M. 2000. 474 s.
10. Ligan G.I. Tochnoe zemledelie // G.I. Ligan, I.G. Smirnov, A.A. Ligan, A.I. Belenkov / Nivy Rossii, №10 (154). 2017. – S. 40-45.
11. Mineev V.G. Khimizatsiya zemledeliya i prirodnyaya sreda. M.: VO Agropromizdat. 1990. 287 s.
12. Muromtsev N.A. i dr. Zakonomernosti defitsita pochvennoi vlagi predkavkazskogo chernozema pod zemovymi kul'turami armavirskogo opytnogo uchastka Pochvennogo instituta RAN. / Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. 2019. №5. S. 5-19.
13. Podrezov P.I., Myazin N.G., Kozhokina A.N. Vliyanie mnogoletnego vneseniya udobrenii na urozhainost' i kachestvo urozhaya sakharnoi svekly, vyrashchivaemoi na chernozeme tipichnom // Vestnik Voronezhskogo GAU. 2021. T. 14. №4(71). S. 49-57. doi: 10.53914/issn2071-2243-2021-4-49.
14. Postnikov P.A., Popova V.V. Migratsiya mineral'nogo azota v dervno-podzolistoi pochve (lizimetriceskii opyt) // Plodorodie. №1, 2019 – S. 26-28.
15. Tyutyunov S.I., Naval'neva E.V., Naval'nev V.V., Logvinov I.V., Litvinov A.I. Vliyanie osnovnykh faktorov sistemy vosproizvodstva plodorodiya pochv na sodержanie podvizhnogo kaliya v chernozeme tipichnom yugo-zapadnoi chasti TSCHR // Zemledelie. 2023. №2. S. 8-12. doi:10.24412/0044-3913-2023-2-8-12.
16. Fillipova L.S. Krugovorot azota i ego soedinenii v pochve / L.S. Fillipova // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. – 2023. №8 (134).<https://research-journal.org/archive/8-134-2023august/10.23670/IRJ.2023.134.37>.doi: 10.23670/IRJ.2023.134.37
17. Fomenko T.G. i dr. Migratsiya biogennykh ehlementov v chernozeme tipichnom pri fertigatsii plodovykh nasazhdenii // T.G. Fomenko, V.P. Topova, E.A. Chernikov, A.I. Drygina, I.A. Lebedovskii, D.V. Uzlovaty, A.N. Myazina / Agrokhiimiya, 2021. №3. S. 60-70.
18. Ehkologicheskie aspekty sel'skogo khozyaistva: vliyanie, zagryaznenie, ustoichivost' // Nauchnye stat'i. Ru – Data poslednego obnovleniya stat'i: 03.12.2023. - <https://nauchniestati.ru/spravka/ekologicheskie-aspekty-selskogo-hozyajstva/> (data obrashcheniya 4.02.2024).
19. Yakushev V.P. Informatsionnoe obespechenie tochnogo zemledeliya // V.P. Yakushev, V.V. Yakushev // SPb.: Izdatel'stvo PTSYAF RAN, 2007. – 382 s.
20. Yakushev V.P., Matvienko D.A., Petrushin A.F. i dr. novyi metod kolichestvennoi otsenki vnutripolevoi izmenchivosti po opticheskim kharakteristikam posevov dlya tochnogo zemledeliya / Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki. 2020. №2. S. 4-10.
21. Abramov N.V. Digitization of agricultural land using an unmanned aerial vehicle // Abramov N.V., Semizorov S.A., Sherstobitov S.V., Ginger M.V., Petukhov D.A. / International Scientific Conference: Agritech-III-2020. Pg. 32002.
22. Campbell C.A., Lenter R.P., R de Jond. Effect of dropping summer follow and fertilizers nitrogen nitric nitrogen logt by laching on brown chernozemic loam. G of soil sci. 2004. T. 64. №1. P. 61-64.
23. Liu S. A critical review of central role of microbial regulation in the nitrogen biogeochemical process: New insights for controlling groundwater nitrogen contamination / S. Liu, T. Zheng, Y.Li.X Zheng // Journal of Environmental Management. – 2023. Vol. 328. – doi: [10.1016/j.jenvman.2022.116959](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116959). 116959 (date of access 23.02.2024).