



Научная статья

УДК 631.8:633.367.2:631.452(470.31)

doi: 10.55186/25876740_2026_69_5_743

ОПТИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЛЕГКОГИДРОЛИЗУЕМОГО АЗОТА ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЛЮПИНА УЗКОЛИСТНОГО НА МАЛОПРОДУКТИВНЫХ ЗЕМЛЯХ

В.А. Шевченко, Н.П. Попова, Г.И. Бондарева, А.М. Соловьев

Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Москва, Россия

Аннотация. На примере дерново-подзолистых почв Верхневолжья изучены теоретические и практические аспекты влияния различных систем удобрения (фактор А) и разноглубинных способов их заделки (фактор В) на баланс легкогидролизуемого азота и степень его закрепления при возделывании люпина узколистного на семена. Установлено, что на контрольном варианте (внесение только измельченных растительных остатков) баланс азота за счёт симбиотической азотификации в сумме за две ротации севооборота составил +38,41 кг/га на фоне минимальной обработки и +49,31 кг/га при применении отвальной вспашки, а степень закрепления равна соответственно +27,4 и +31,9%. Заделка расчётных доз NPK на запланированную урожайность снизила баланс легкогидролизуемого азота за период исследования по сравнению с контролем на 17,04 кг/га на фоне минимальной обработки и на 34,50 кг/га при применении отвальной вспашки, а степень его закрепления снизилась соответственно на 19,4 и 26,5%, что достоверно для взаимодействия факторов АВ. При систематической утилизации жидких животноводческих стоков возврат азота превысил его вынос с урожаем зерна на 88,31 кг/га на фоне минимальной обработки и на 82,62 кг/га с применением отвальной вспашки, тогда как при заделке твёрдой фракции навоза превышение составило 155,19 и 147,16 кг/га соответственно. Заделка всех видов удобрений дисковыми орудиями более эффективна по сравнению с отвальной вспашкой как по формированию баланса, так и по степени закрепления легкогидролизуемого азота в пахотном слое осваиваемых почв, поэтому может быть рекомендована в качестве перспективного энергосберегающего приёма при возделывании люпина узколистного в условиях Верхневолжья.

Ключевые слова: система удобрения, жидкие стоки, твёрдая фракция навоза, минимальная обработка, отвальная вспашка, дерново-подзолистые легкосуглинистые почвы, баланс и закрепление азота

Original article

OPTIMIZATION OF THE CONTENT OF EASILY HYDROLYZABLE NITROGEN IN THE CULTIVATION OF NARROW-LEAVED LUPINE ON UNPRODUCTIVE LANDS

V.A. Shevchenko, N.P. Popova, G.I. Bondareva, A.M. Soloviyov

Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russia

Abstract. Using the example of sod-podzolic soils of the Upper Volga region, the theoretical and practical aspects of the influence of various fertilizer systems (factor A) and multi-depth methods of their embedding (factor B) on the balance of easily hydrolyzable nitrogen and the degree of its fixation during cultivation of narrow-leaved lupine on seeds have been studied. It was found that in the control variant (application of only crushed plant residues), the nitrogen balance due to symbiotic nitrogen fixation in the total of two rotations of crop rotation was +38.41 kg/ha against the background of minimal processing and +49.31 kg/ha with the use of dump plowing, and the degree of fixation was +27.4 and +31.9%, respectively. The addition of calculated doses of NPK to the planned yield reduced the balance of easily hydrolyzable nitrogen during the study period by 17.04 kg/ha against the background of minimal treatment and by 34.50 kg/ha with the use of dump plowing, and the degree of its fixation decreased by 19.4 and 26.5%, respectively, which is significant for the interaction of AB factors. With the systematic utilization of liquid livestock effluents, nitrogen return exceeded its removal from the grain harvest by 88.31 kg/ha against the background of minimal processing and by 82.62 kg/ha using dump plowing, whereas when sealing the solid fraction of manure, the excess was 155.19 and 147.16 kg/ha, respectively. Sealing of all types of fertilizers with disk implements is more effective than dump plowing both in terms of the formation of balance and the degree of fixation of easily hydrolyzable nitrogen in the arable layer of cultivated soils, therefore it can be recommended as a promising energy-saving technique for the cultivation of narrow-leaved lupine in the Upper Volga region.

Keywords: fertilizer system, liquid effluents, solid fraction of manure, minimal tillage, dump plowing, sod-podzolic light loamy soils, nitrogen balance and fixation

Введение. Земли сельскохозяйственного назначения Нечерноземной зоны, вовлекаемые в использование, в первую очередь имеют низкое содержание азота, которое проявляется при его концентрации в пахотном слое менее 60 мг/кг почвы. При этом не только снижается урожайность, но и ухудшается качество продукции растениеводства, поскольку замедляется синтез аминокислот и белков [1,2].

Симптомы избытка азота в корнеобитаемом горизонте проявляются при его содержании 90...100 мг/кг почвы [3]. Надземная часть растений бурно развивается, листья имеют тёмно-зелёную окраску, однако при этом формируются рыхлые ткани стеблей, которые лежат под воздействием ветров и дождей, созревание посевов затягивается, а в растительной продукции

накапливаются нитраты в повышенных концентрациях, вызывающие тяжёлые заболевания людей и животных. В организме человека нитраты превращаются в нитриты, ионы которых переводят гемоглобин в метгемоглобин, не способный переносить кислород по кровеносной системе, следствием чего является хроническая гипоксия, вызывающая удушье. Для исключения данного заболевания следует поддерживать в пахотном слое почвы безопасный азотный режим на уровне 75...80 мг/кг, особенно при выращивании посевов на минеральной системе удобрения [3,4].

При освоении залежных земель Нечерноземья важнейшим фактором, лимитирующим почвенное плодородие, является высокий дефицит азота в сочетании с его значительными

потерями из-за климатических и технологических факторов. По оценкам специалистов, для большинства дерново-подзолистых почв Нечерноземья свойственно низкое содержание гумуса (1,5–2,5%), а также общего азота (0,1–0,15%). Ситуацию усугубляет высокая кислотность почвенного раствора ($pH_{\text{кд}}$ 4,0–5,5), которая напрямую угнетает развитие полезных микроорганизмов и снижает доступность элементов питания для растений. Кроме того, промывной тип водного режима способствует активному вымыванию биогенных элементов и прежде всего легкоподвижного нитратного азота, а также благоприятствует различным эрозионным процессам. В среднем безвозвратные потери азота могут составлять 6,2–7,6 кг/га в год, а в дождливые периоды возрастать до 15,6 кг/га. При этом на



склоновых землях ежегодные потери азота могут составлять от 1,5 до 46,0 кг/га в зависимости от возделываемой культуры, что дополнительно усугубляет дефицит данного элемента [5,6].

Отдельный вопрос, который носит двухсторонний характер, составляет процесс иммобилизации азота микроорганизмами. Установлено, что благодаря этому процессу может временно закрепляться микроорганизмами в труднодоступную для растений форму до 40% азота удобрений, особенно при использовании соломы с высоким отношением С:N. Одновременно, в результате обработки почвы существенно увеличиваются потери азота, который улетучивается в атмосферу в виде газов (аммиак, закись азота) [7,8].

Исследованиями коллектива ученых МГУ им. М.В. Ломоносова установлено, что внесение высоких доз минеральных удобрений (свыше 100–150 кг/га д.в.) без применения органических может быть не только малоэффективно из-за потерь азота на иммобилизацию и вымывание, но также ухудшает ферментативную активность почвы, что запускает нарушения гумусного баланса. При этом на малопродуктивных почвах урожайность культур на 60–80% зависит от уровня минерального питания и в первую очередь, азотного [7,9]. Дело в том, что в отличие от минеральных, органические удобрения способствуют формированию прочного положительного баланса. Например, внесение навоза в дозе 40 т/га на фоне NPK обеспечивает накопление 140–158 кг/га минерального азота за ротацию севооборота, а также увеличивает почвенные запасы на 37,6–45,6% [10].

Таким образом, эффективное управление азотным режимом малопродуктивных почв при их освоении требует глубокого научного подхода и изучения. Прежде всего необходимо внедрять технологии, способствующие поддержанию бездефицитного баланса гумуса, например, за счет использования приемов комплексной мелиорации, а также оптимизации доз и форм удобрений. Важную роль играет и обработка почвы: в ряде исследований показано, что для органических удобрений на таких почвах предпочтительнее минимальная обработка, так как она лучше способствует накоплению легкогидролизуемого азота по сравнению с глубокой вспашкой [11,12].

В то же время необходимо отметить, что диагностика азота является самой сложной из всех биофильных элементов в практике агрохимической службы, что обусловлено быстрой минерализацией органического вещества в аэробных условиях, связыванием его значительной части микроорганизмами (процесс иммобилизации), растворимостью азотсодержащих удобрений и ускоренным передвижением по профилю почвы под действием поливов и атмосферных осадков, что в итоге приводит к безвозвратным потерям, вызывает загрязнение грунтовых вод и водоемов [13].

При освоении залежных земель важное значение в регулировании азотного режима отводится выбору эффективных способов обработки и соблюдению агрономических требований при возделывании на них сельскохозяйственных культур, поскольку только надлежащая аэрация пахотного слоя, заделка в необходимых количествах и в оптимальные сроки органических удобрений, внесение известковых материалов на кислых почвах значительно усиливают процесс нитрификации, увеличивают накопление легкогидролизуемого азота, доступного для растений, и тем самым повышают плодородие

корнеобитаемого горизонта [14]. Вот почему диагностике азотного режима на вовлекаемых в производственный цикл залежных землях должно уделяться постоянное внимание.

Научная новизна работы определяется комплексным подходом к изучению влияния различных систем удобрения (минеральной, органической на основе жидких стоков и твердой фракции навоза, а также их совместного применения) и способов основной обработки почвы (отвальная вспашка на 18–20 см и минимальная обработка на 7–10 см дисковыми орудиями) на содержание легкогидролизуемого азота в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Исследование охватывает период более десяти лет, выполненное на залежных малопродуктивных землях Верхневолжья при возделывании люпина узколистного; впервые оценено результирующее действие изученных факторов на накопление и закрепление данного биогенного элемента.

Методика проведения исследований. Исследование проводили на опытном участке агрофирмы ООО «Ручьевское-1» Ржевского района, расположенной в Тверской области, в 2015–2024 гг. при освоении залежных земель. Почва дерново-подзолистая легкосуглинистая, мощность пахотного слоя 16...18 см; при освоении восстановлена система открытого дренажа. Первичное агрохимическое обследование показало очень низкое содержание гумуса — 1,69...1,83%; P_2O_5 — повышенное — 106...109 мг/кг; K_2O 90...100 мг/кг — среднее; pH_{KCl} — 4,78...4,83. Главная задача при освоении залежи — производство необходимого объема фуражной и кормовой продукции для свиноводческого комплекса хозяйства. При этом должна решаться и задача безопасной утилизации отходов свиноводческих комплексов — жидкой и твердой фракции навоза. Поэтому целью исследований явилось научное обоснование приемов повышения плодородия малопродуктивных земель с установлением эффективной системы удобрения, а также способом основной обработки и заделки удобрений.

Закладка полевого опыта проведена методом систематических повторений в 4-кратной повторности. Учётная площадь делянки составляла 40 м² при общей площади 100 м². Севооборот пятипольный со следующим чередованием культур: люпин узколистный на семена, кукуруза на силос, озимая пшеница, яровой рапс, ячмень на фураж. В схеме опыта изучали три фактора и их взаимодействия.

Фактор А — системы удобрения: минеральная (расчётные дозы NPK на планируемую урожайность каждой культуры по общепринятым методикам), органо-минеральная (жидкие стоки свиноводческих комплексов — 80 м³/га, твердая фракция навоза — 40 т/га, а также их сочетания); контроль (поживные остатки как источник органического вещества и элементов питания). На всех вариантах, кроме контроля, дополнительно при посеве вносили суперфосфат (10 кг д.в./га). Планируемая урожайность люпина узколистного (18 ц/га семян); количество требуемых удобрений установлена на основании расчетов по методике М.К. Каюмова [15].

Фактор В — способы основной обработки почвы: отвальная вспашка на глубину 18–20 см; минимальная обработка дискованием на 7–10 см.

Азотные удобрения применяли дробно: 50% — под предпосевную культивацию,

25% — при посеве, 25% — в подкормку. Фосфорные и калийные туки вносили в дозах, рассчитанных с учётом коэффициентов использования из удобрений. Для люпина узколистного при плановой урожайности 18 ц/га расчётная норма составила: N — 115,5; P_2O_5 — 10,0; K_2O — 44,5 кг д.в./га.

Состав жидких стоков (сухое вещество — 3,0%, общий N — 0,1%, подвижный P_2O_5 — 0,03%, обменный K_2O — 0,28%, pH 7,4) вносили шланговыми агрегатами под предпосевную обработку, что обеспечивало равномерное распределение и одновременную заделку, снижая потери газообразного азота. Поступление питательных веществ с жидкими стоками составляло в среднем: N — 123, P_2O_5 — 36, K_2O — 59 кг/га.

Твёрдую фракцию навоза (сухое вещество 35–40%, общий N — 0,54%, P_2O_5 — 0,29%, K_2O — 0,60%, pH 7,9) вносили разбрасывателем ПРТ-10 с немедленной заделкой в почву. С твёрдой фракцией поступало в среднем: N — 120, P_2O_5 — 34, K_2O — 33 кг/га. Органические удобрения вносили ежегодно в качестве основного.

Безопасная норма применения жидких животноводческих стоков обоснована предварительными исследованиями фильтрационной способности почвы (методом скважин) и последующей корректировкой по накоплению тяжёлых металлов. Подробные результаты и рекомендации с учётом крутизны склона изложены в отдельной монографии авторов [16]. Агрохимические исследования почвы и удобрений выполняли по стандартным методикам.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методами дисперсионного и корреляционного анализа по Б.А. Доспехову с использованием критерия НСР₀₅ [17].

Результаты и их обсуждение. Установлено, что азотный режим осваиваемых земель при возделывании люпина узколистного на зерно зависит как от системы удобрения, так и от способов их заделки в пахотный слой. На основании анализа данных, представленных в таблице 1, установлено, что на контрольном варианте максимальное количество легкогидролизуемого азота в сумме за две ротации севооборота (84,0...85,0%) приходится на пожнивно-корневые остатки, поскольку в них содержится симбиотический азот, накопленный клубеньковыми бактериями. По этой причине баланс азота на контроле (в отличие от других культур севооборота) всегда остаётся положительным и составляет в сумме за период исследования +38,41 кг/га на фоне минимальной обработки и +49,31 кг/га с применением отальной вспашки, что является существенным различием в пользу глубокой обработки (+10,90 кг/га) при НСР₀₅ для АВ = 3,79 кг. Коэффициент возврата легкогидролизуемого азота также на варианте отальной вспашки превышает аналогичный показатель при минимальной обработке на 9,08%, что является достоверным увеличением для фактора В при НСР₀₅ = 9,02%.

Возделывание люпина узколистного с внесением в качестве основного удобрения расчётных доз минеральных удобрений под запланированную урожайность зерна 1,8 т/га по фону извлечённых растительных остатков способствует значительному увеличению накопления в пахотном слое легкогидролизуемого азота по сравнению с контрольным вариантом, однако при этом существенно увеличивается и его вынос с урожаем основной и побочной продукции, поэтому баланс азота в данном случае уменьшился



на 17,04 кг/га при минимальной обработке и на 34,50 кг/га с использованием отвальной вспашки, а коэффициент возврата азота — соответственно на 29,08 и 41,23%, что является статистически доказуемым положением. Главной причиной такого снижения баланса азота является уменьшение симбиотической активности люпина на фоне использования минеральной системы удобрения. Так, если на контрольном варианте возврат легкогидролизуемого азота от соломы по отношению к пожнивно-корневым остаткам составляет 1:5,24 и 1:5,37 по фонам обработки, то при минеральной системе удобрения он снижается до 1:3,60 и 1:3,47 соответственно. Следовательно, при внесении в качестве основного удобрения расчётных доз минеральных туков азотфиксирующая способность люпина в 1,64 раза ниже на фоне минимальной обработки и в 2,20 раза при отвальной вспашке по сравнению с контролем. На основании анализа полученных результатов можно утверждать, что при освоении вышедших из оборота земель, богатых азотом, азотные удобрения при возделывании бобовых культур вносить нецелесообразно, поскольку они лишь повышают себестоимость продукции и незначительно улучшают азотный режим залежных земель.

Утилизация органических отходов животноводческого комплекса в сочетании с заделкой растительных остатков люпина обеспечивает значительное накопление легкогидролизуемого азота как по сравнению с контролем, так и с применением минеральной системы удобрения. Так, при внесении жидких животноводческих стоков перед посевом люпина узколистного в дозе 80 м³/га возврат азота превысил его вынос с урожаем в сумме за две ротации на 88,31 кг/га при минимальной обработке и на 82,62 кг/га при отвальной вспашке. Превышение накопления доступного азота от применения поверхностной заделки стоков составляет 5,69 кг/га, что статистически достоверно для взаимодействия изученных факторов при НСР₀₅ для АВ = 3,79 кг.

Соотношение между поступлением азота на фоне утилизации жидких стоков от соломы и пожнивно-корневыми остатками составляет 1:3,72 при минимальной обработке и 1:3,61 от применения отвальной вспашки. Если сравнивать структуру азота, поступающего в пахотный слой с различными источниками возобновляемых биоресурсов органического вещества, то при поверхностной обработке дисковыми орудиями 58,9% приходится на пожнивно-корневые остатки, 25,3% — на жидкие стоки и 15,8% — на солому. В случае применения отвальной вспашки аналогичное соотношение составляет (%): 59,1 : 24,36 : 16,3, что практически одинаково с минимальной обработкой.

Следовательно, ликвидация дефицита легкогидролизуемого азота на осваиваемых малопродуктивных землях Верхневолжья при заделке жидких животноводческих стоков по фону измельчённых остатков люпина является эффективным агрономическим приемом.

Тем не менее, поверхностная заделка жидких животноводческих стоков способствует более значительному обогащению посевного слоя почвы за счёт снижения фильтрации стоков за пределы корнеобитаемого горизонта и активизации деятельности почвенной микрофлоры в горизонте 0–10 см.

Достоверное увеличение накопления азота от применения жидких стоков по сравнению с минеральной системой объясняется присутствием в их составе от 3 до 6% сухих веществ, после минерализации которых приход легкогидролизуемого азота в слой почвы 0–20 см существенно повышается.

Максимальное поступление азота в сумме за две ротации севооборота зафиксировано при систематическом внесении твёрдой фракции навоза по фону измельчённых соломисто-пожнивных остатков люпина. В данном случае положительный баланс доступного азота составил 155,19 кг/га при минимальной обработке и 147,16 кг/га от применения отвальной

вспашки, а коэффициент его возврата — соответственно 170,18 и 161,96%. Различия в пользу поверхностной утилизации твёрдой фракции навоза составляет 8,03 кг/га, что существенно для взаимодействия факторов АВ.

Соотношение между источниками поступления легкогидролизуемого азота при использовании твёрдой фракции навоза на фоне минимальной обработки составляет: 48,8% — от пожнивно-корневых остатков, 38,2% — от удобрений и 13,0% — от соломы; при заделке твёрдой фракции навоза отвальными плугами — соответственно (%) 49,0 : 37,4 : 13,6.

Таким образом, в структуре возврата азота по сравнению с утилизацией жидких стоков существенно увеличивается его приход от твёрдой фракции (+12,1...+12,9%) и уменьшается от пожнивно-корневых остатков (–10,1%), тогда как вклад соломы в формирование доступного азота значимых изменений не претерпевает. Коэффициент возврата азота на фоне внесения твёрдой фракции по сравнению с утилизацией жидких стоков выше на 31,36% при поверхностной обработке и на 27,79% от применения отвальной вспашки, что существенно для комплексного взаимодействия факторов при НСР₀₅ для АВ = 15,88%.

Следовательно, при дополнительном внесении всех видов удобрений по фону измельчённых остатков побочной продукции люпина преимущество в условиях промывного типа водного режима по формированию баланса легкогидролизуемого азота остаётся за минимальной обработкой, что даёт основания при наличии эффективных средств защиты посевов от сорняков рекомендовать её как перспективный энергосберегающий приём.

Различная масса органических остатков и неодинаковая скорость их минерализации при разных способах заделки также вызывают вариативность интенсивности высвобождения и закрепления легкогидролизуемого азота в пахотном слое осваиваемых земель (табл. 2).

Таблица 1. Вынос и возврат легкогидролизуемого азота (кг/га) на посевах люпина узколистного при разных системах удобрения и разноглубинных способах их заделки (2015–2024 гг.)
Table 1. Removal and return of easily hydrolyzable nitrogen (kg/ha) in narrow-leaved lupine crops with different fertilizer systems and different depth methods of their sealing (2015–2024)

Система удобрения (фактор А)		Ротация севооборота	Способ обработки (фактор В)													
			Минимальная обработка на 7-10 см							Отвальная вспашка на 18-20 см						
			Общий вынос, кг/га	Возврат, кг/га				Баланс, +/-	Коэффициент возврата,%	Общий вынос, кг/га	Возврат, кг/га			Баланс, +/-	Коэффициент возврата,%	
				От соломы	От ПКО и по- следствия	От удобре- ний	всего				От соломы	От ПКО и по- следствия	От удобре- ний			всего
Контроль (без удобрений)		1	50,05	11,01	58,63	0,00	69,64	+19,59	139,14	51,95	11,44	65,00	0,00	76,44	+24,49	174,14
		2	51,54	11,42	58,94	0,00	70,36	+18,82	136,52	53,18	11,71	66,29	0,00	78,00	+24,82	146,67
		всего	101,59	22,43	117,57	0,00	140,00	+38,41	137,83	105,13	23,15	131,29	0,00	154,44	+49,31	146,91
Расчетные дозы НРК на за- планированную урожайность (N — 115,53; P ₂ O ₅ — 10,0; K ₂ O — 44,52 кг/га д.в.)		1	119,20	26,00	94,05	10,00	130,05	+10,85	109,10	127,91	28,08	98,16	10,00	136,24	+8,33	106,51
		2	125,39	27,52	98,39	10,00	135,91	+10,52	108,39	133,62	29,24	100,86	10,00	140,10	+6,48	104,85
		всего	244,59	53,52	192,44	20,00	265,96	+21,37	108,75	261,53	57,32	199,02	20,00	276,34	14,81	105,65
Жидкие стоки, 80 м³/га +P ₁₀ кг д.в./га при посеве		1	110,64	24,25	91,55	40,00	155,80	+45,16	140,82	117,50	25,73	94,27	40,00	160,00	+42,50	136,17
		2	17,23	25,77	94,61	40,00	160,38	+43,15	136,81	124,71	27,35	97,48	40,00	164,83	+40,12	132,17
		всего	227,87	50,02	186,16	80,00	316,18	+88,31	138,82	242,21	53,08	191,75	80,00	324,83	82,62	134,17
Твердая фракция навоза, 40 т/га+ P ₁₀ кг д.в./га при посеве		1	106,76	23,58	90,37	72,00	185,95	+79,19	174,18	114,38	25,07	92,44	72,00	189,51	+75,13	165,68
		2	114,85	25,44	93,41	72,00	190,85	+76,00	166,17	123,69	27,23	96,49	72,00	195,72	+72,03	158,23
		всего	221,61	49,02	183,78	144,00	376,80	155,19	170,18	238,07	52,30	188,93	144,00	385,23	+147,16	161,96
НСР ₀₅	Для А	7,61	1,68	6,39	2,22	8,56	2,48	9,75								
	Для В	7,28	1,62	6,25	2,13	8,24	2,27	9,02								
	Для АВ	12,58	2,39	10,55	3,41	14,20	3,79	15,88								





Таблица 2. Условное закрепления легкогидролизуемого азота в пахотном слое почвы на посевах люпина узколистного в двух ротациях севооборота (2015-2024 гг.)
Table 2. Conditional fixation of easily hydrolyzable nitrogen in the arable soil layer on crops of narrow-leaved lupine in two rotations of crop rotation (2015-2024)

Система удобрения (фактор А)	Ротация севооборота	Способ обработки (факторов В)					
		Минимальная обработка			Отвальная вспашка		
		поступило, кг/га	прибавка, кг/га	закрепи- лось, %	поступило, кг/га	прибавка, кг/га	закрепи- лось, %
Контроль (без удобрений)	1	69,64	+19,59	+28,1	76,44	+24,49	+32,0
	2	70,36	+18,82	+26,7	78,00	+24,82	+31,8
	В среднем	70,00	+19,21	+27,4	77,22	+24,66	+31,9
Расчетные дозы NPK на запланированную урожайность (N — 115,53; P ₂ O ₅ — 10,0; K ₂ O — 44,52 кг/га д.в.)	1	130,05	+10,85	+8,3	136,24	+8,33	+6,1
	2	135,91	+10,52	+7,7	140,10	+6,48	+4,6
	В среднем	132,98	+10,69	+8,0	138,17	+7,41	+5,4
Жидкие стоки, 80 м ³ /га + P ₁₀ кг д.в./га при посеве	1	155,80	+45,16	+29,0	160,00	+42,50	+26,6
	2	160,38	+43,15	+26,9	164,83	+40,12	+24,3
	В среднем	158,09	+44,16	+28,0	162,42	+41,31	+25,4
Твердая фракция навоза, 40 т/га + P ₁₀ кг д.в./га при посеве	1	185,95	+79,19	+42,6	189,51	+75,13	+39,6
	2	190,85	+76,00	+39,8	195,72	+72,03	+36,8
	В среднем	188,40	+77,60	+41,2	192,62	+73,58	+38,2
НСР ₀₅	Для А	8,56	2,48	1,8			
	Для В	8,24	2,27	1,7			
	Для АВ	14,20	3,79	3,1			

Установлено, что на контрольном варианте в среднем за ротацию севооборота на посевах люпина узколистного при минимальной обработке поступило 70,00 кг/га доступного азота, из которых 27,4% закрепилось в пахотном слое, тогда как на фоне отальной вспашки — соответственно 77,22 кг/га и 31,9%.

Таким образом, положительная разница по степени закрепления азота без дополнительного внесения удобрений при обработке залежи отвальными плугами составляет 4,5%, что существенно для АВ при НСР₀₅ = 3,1%.

Возделывание люпина узколистного на минеральной системе удобрения способствует значимому увеличению поступления азота в пахотный слой осваиваемых земель, однако из-за получения урожайности зерна, близкой к запланированной, его вынос также существенно возрастает, а степень закрепления уменьшается. Так, на фоне минимальной обработки в среднем за ротацию севооборотов поступление легкогидролизуемого азота увеличилось относительно контроля на 62,98 кг/га, а степень его закрепления снизилась на 19,4%. Применение отальной вспашки также обеспечивает повышение концентрации азота в пахотном слое в среднем до 138,17 кг/га, однако из этого количества закрепилось лишь 5,4%. Таким образом, интенсивность накопления и закрепления легкогидролизуемого азота на деградированных землях Верхневолжья при внесении расчётных доз минеральных удобрений под запланированную урожайность люпина определяется его выносом на формирование основной и побочной продукции, а также количеством поступившей биомассы и глубиной их заделки в пахотный слой почвы.

Использование для заделки промышленных туков отальной вспашки снижает степень закрепления азота на 2,6%, что является достоверным различием для фактора В.

Совместное применение соломенно-познивных остатков и жидких стоков свиноводческого комплекса в дозе 80 м³/га усиливает интенсивность поступления легкогидролизуемого азота в пахотный слой осваиваемых земель в среднем за ротацию севооборота до 158,09 кг/га на фоне минимальной обработки и до 162,42 кг/га с применением отальной вспашки, а степень его закрепления повышается соответственно до +28,0

и +25,4%. При этом различие по интенсивности закрепления азота составляет +2,6%, что также существенно только для фактора В и соответствует ошибке опыта для взаимодействия факторов А и В. Таким образом, степень закрепления доступного азота при внесении жидких стоков по фону измельчённых остатков побочной продукции люпина зависит не только от количества органического вещества, поступившего в пахотный слой, но и от глубины его заделки в обрабатываемый горизонт. Рыхление пахотного слоя на глубину 18–20 см и свободный доступ кислорода при отальной вспашке способствуют повышению микробиологической активности в обрабатываемом горизонте и обеспечивают бурное разложение органического вещества с образованием минерального азота и последующим его вымыванием в условиях промывного водного режима или восстановлением до молекулярного азота и улетучиванием в атмосферу.

Следует также отметить, что в процессе минерализации органического вещества часть легкогидролизуемого азота используется микрофлорой почвы, что вызывает иммобилизацию (биологическое закрепление), который становится доступным для посевов только после отмирания микроорганизмов. Максимальное поступление легкогидролизуемого азота в среднем за ротацию севооборота (+188,40 кг/га на фоне минимальной обработки и +192,62 кг/га при применении отальной вспашки), а также его прибавка (соответственно +77,60 и +73,58 кг/га) обеспечиваются систематической заделкой твёрдой фракции навоза в пахотный слой осваиваемой почвы. В данном случае интенсивность закрепления азота составляет +41,2% при минимальной обработке и 38,2% на фоне отальной вспашки, что достоверно выше по сравнению с применением всех изученных систем удобрений и технологий возделывания люпина узколистного. Разница закрепления азота от внесения твёрдой фракции навоза в пользу минимальной обработки составляет 3,0%, что достоверно для фактора В.

На основании анализа представленных данных можно утверждать, что максимальное положительное влияние на интенсивность закрепления азота в пахотном слое деградированных земель оказывает совместное внесение

измельчённых растительных остатков люпина узколистного и органических отходов животноводческого комплекса в экологически безопасных дозах.

Заключение

1. Баланс азота под культурой люпина узколистного на контрольном варианте (без внесения удобрений) за счёт симбиотической азотификации клубеньковыми бактериями атмосферного азота остаётся положительным и в сумме за две ротации севооборота составляет +38,41 кг/га на фоне минимальной обработки и +49,31 кг/га при использовании отальной вспашки, а степень его закрепления равна соответственно +27,4 и +31,9%, что во всех случаях является существенной разницей для фактора В в пользу глубокой обработки пахотного слоя.

2. При внесении расчётных доз NPK на запланированную урожайность люпина узколистного накопление легкогидролизуемого азота по сравнению с контролем возрастает в 1,79...1,90 раза, однако при этом существенно увеличивается его вынос основной продукцией, поэтому баланс азота за период исследования уменьшается относительно контроля на 17,04 кг/га при минимальной обработке и на 34,50 кг/га с применением отальной вспашки, а уровень закрепления — соответственно на 19,4 и 26,5%, что достоверно для взаимодействия факторов АВ.

3. Решающее значение в формировании положительного баланса легкогидролизуемого азота в пахотном слое малопродуктивных земель принадлежит заделке в качестве основного удобрения органических отходов свиноводческого комплекса. Так, при внесении жидких стоков в дозе 80 м³/га возврат азота превысил его вынос с урожаем зерна на 88,31 кг/га на фоне минимальной обработки и на 82,62 кг/га от применения отальной вспашки, а степень его закрепления в пахотном слое осваиваемой почвы составила соответственно +28,0 и +25,4%, что во всех случаях существенно выше, чем при использовании минеральной системы удобрения.

4. Систематическая утилизация твёрдой фракции навоза в дозе 40 т/га обеспечивает максимальное поступление легкогидролизуемого азота в пахотный слой малопродуктивных осваиваемых земель. При этом положительный



баланс азота в сумме за две ротации севооборота равен 155,19 кг/га на фоне минимальной обработки и 147,16 кг/га с применением отвальной вспашки, а степень его закрепления составляет соответственно 41,2 и 38,2%, что существенно выше аналогичных показателей от внесения как расчётных доз NPK, так и от утилизации жидких стоков.

Список источников

1. Сычев В.Г. Плодородие почв России и пути его регулирования / В.Г. Сычев, С.А. Шафран, С.Б. Виноградова // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 3-13.
2. Осипов А.И. Роль азота в плодородии почв и питании растений / А.И. Осипов, О.А. Соколов. Санкт-Петербург: АФИ, 2001. 360 с.
3. Сычев В.Г. Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений / В.Г. Сычев, С.А. Шафран. Москва: ВНИИА, 2014. 296 с.
4. Мусаев Ф.А. Оценка загрязнения мелиорируемого агроландшафта азотсодержащими веществами и методы их снижения / Ф.А. Мусаев, К.Н. Евсенкин, Ю.П. Добрачев и др. Рязань: РГТУ, 2014. 28 с.
5. Постников П.А. Миграция минерального азота в дерново-подзолистой почве (лизиметрический опыт) / П.А. Постников, В.В. Попова // *Плодородие*. 2019. № 1. С. 26-28. DOI: 10.25680/S19948603.2019.106.08.
6. Марчук Е.В. Эффективность минеральной и органической систем удобрения на дерново-подзолистой почве при дефицитном балансе элементов питания / Е.В. Марчук // *Агрохимический вестник*. 2019. № 3. С. 54-59. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10043.
7. Завалин А.А. Поток 15N, почвенного и симбиотического азота в дерново-подзолистой эродированной почве / А.А. Завалин, Н.Я. Шмырева, О.А. Соколов // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 22-32. DOI: 10.31857/S0002188120060149.
8. Кидин В.В. Влияние рыхления и аэрации почвы разных горизонтов на ее биологическую активность, аммонификацию и денитрификацию / В.В. Кидин, В.В. Зенкина // *Известия ТСХА*. 2008. Вып. 3. С. 33-41.
9. Хомяков Д.М. Опыт по окультуриванию дерново-подзолистых пахотных почв учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ «Чашниково» / Д.М. Хомяков, Т.И. Хуснетдинова, В.С. Егоров, И.А. Кутузова // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2025. Т. 80. № 3. С. 57-69. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-57-69.
10. Дзюин А.Г. Изменения запасов минерального азота в дерново-подзолистой суглинистой почве / А.Г. Дзюин // *Агрохимический вестник*. 2019. № 6. С. 30-33. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10086.
11. Шевченко В.А. Азотный режим осваиваемых дерново-подзолистых почв Нечерноземья в зернопаровом плодосменном севообороте при разных системах удобрений и обработки / В.А. Шевченко, А.М. Соловьев, Н.П. Попова // *Природообустройство*. 2024. № 5. С. 28-36. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-28-36.

Информация об авторах:

Шевченко Виктор Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, директор, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5444-9693>, Scopus ID: 57209792752, SPIN-код: 8028-2743, shevchenko.v.a@yandex.ru

Попова Наталья Павловна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела управления плодородием почв мелиорируемых земель, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9301-027X>, Scopus ID: 57219096264, SPIN-код: 1891-2369, lyn.popova@yandex.ru

Бондарева Галина Ивановна, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела управления плодородием почв мелиорируемых земель, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7816-7968>, Scopus ID: 57210220490, SPIN-код: 1626-3289, boss2569@yandex.ru

Соловьев Алексей Малахович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий отделом управления плодородием почв мелиорируемых земель, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8387-0989>, Scopus ID: 57219090365, SPIN-код: 6080-1245, solo-a45@mail.ru

Information about the author (authors):

Viktor A. Shevchenko, doctor of agricultural sciences, professor, academician of the Russian Academy of Sciences (RAS), director, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5444-9693>, Scopus Author ID: 57209792752, SPIN-code: 8028-2743, shevchenko.v.a@yandex.ru

Natalya P. Popova, candidate of agricultural sciences, associate professor, leading researcher of the department for management of soil fertility of reclaimed lands, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9301-027X>, Scopus Author ID: 57219096264, SPIN-code: 1891-2369, lyn.popova@yandex.ru

Galina I. Bondareva, doctor of technical sciences, associate professor, chief researcher of the department for management of soil fertility of reclaimed lands, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7816-7968>, Scopus Author ID: 57210220490, SPIN-code: 1626-3289, boss2569@yandex.ru

Aleksey M. Soloviyev, doctor of agricultural sciences, professor, head of the department for management of soil fertility of reclaimed lands, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8387-0989>, Scopus Author ID: 57219090365, SPIN-code: 6080-1245, solo-a45@mail.ru

12. Макаров И.Б. Окультуривание подзолистых почв: актуальные аспекты / И.Б. Макаров, П.Н. Балабко, В.Ф. Басевич, Д.В. Карпова, Т.И. Хуснетдинова // *Агрохимический вестник*. 2018. № 2. С. 6-8.

13. Сычев В.Г. Основные направления исследований по агрохимии азота в современном земледелии / В.Г. Сычев, С.А. Шафран, Д.М. Анискт [и др.] // *Бюллетень Географической сети опытов с удобрениями*. Москва: ВНИИА, 2009. № 6. 76 с.

14. Гамзиков Г.П. Системный комплексный подход в агрохимических исследованиях биогенных элементов в агроценозах (на примере азота) / Г.П. Гамзиков // *Агрохимия*. 2014. № 8. С. 3-16.

15. Каюмов М.К. Программирование урожаев сельскохозяйственных культур. Москва: Агропромиздат, 1989. 320 с.

16. Шевченко В.А. Безопасное использование органических отходов свиноводческих комплексов при вовлечении в оборот земель сельскохозяйственного назначения: методические рекомендации / В.А. Шевченко, А.М. Соловьев, Г.И. Бондарева и др. Москва: ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2021. 40 с. ISBN 978-5-907464-10-0. DOI: 10.37738/VNIIGIM.2021.77.10.001. EDN PCCSKG.

17. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.

References

1. Sychev, V.G., Shafran, S.A. & Vinogradova, S.B. (2020). *Plodorodie почв Rossii i puti ego regulirovaniya* [Soil Fertility in Russia and Ways of Its Regulation]. *Agrokhimiya*, no. 6, pp. 3-13.
2. Osipov, A.I. & Sokolov, O.A. (2001). *Rol' azota v plodorodii i pitanii rastenii* [The Role of Nitrogen in Soil Fertility and Plant Nutrition]. Saint Petersburg, AFI.
3. Sychev, V.G. & Shafran, S.A. (2013). *Agrokhimicheskie svoystva почв i effektivnost' mineral'nykh udobrenii* [Agrochemical Properties of Soils and the Efficiency of Mineral Fertilizers]. Moscow, VNIIA.
4. Musaev, F.A., Evsenkin, K.N., Dobrachev, Yu.P. et al. (2014). *Otsenka zagryazneniya melioriruemogo agrolandshafta azotzagryaznyayushchimi veshchestvami i metody ikh snizheniya* [Assessment of Pollution of a Reclaimed Agricultural Landscape by Nitrogen-Polluting Substances and Methods for Its Reduction]. RYAZAN, RGATU.
5. Postnikov, P.A. & Popova, V.V. (2019). *Migratsiya mineral'nogo azota v derново-podzolistoi pochve (lizimetriceskii opyt)* [Migration of Mineral Nitrogen in Sod-Podzolic Soil: A Lysimetric Experiment]. *Plodorodie*, no. 1, pp. 26-28. DOI: 10.25680/S19948603.2019.106.08.
6. Marchuk, E.V. (2019). *Effektivnost' mineral'noi i organicheskoi sistem udobreniya na derново-podzolistoi pochve pri defitsitnom balanse elementov pitaniya* [Efficiency of Mineral and Organic Fertilization Systems on Sod-Podzolic Soil under a Deficient Nutrient Balance]. *Agrokhimicheskii vestnik*, no. 3, pp. 54-59. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10043.
7. Zavalin, A.A., Shmyreva, N.Ya. & Sokolov, O.A. (2020). *Potoki 15N, pochvennogo i simbioticheskogo azota v derново-podzolistoi erodirovannoi pochve* [Fluxes of 15N, Soil and

Symbiotic Nitrogen in Sod-Podzolic Eroded Soil]. *Agrokhimiya*, no. 6, pp. 22-32. DOI: 10.31857/S0002188120060149.

8. Kidin, V.V. & Zenkina, V.V. (2008). *Vliyaniye rykhleniya i aeratsii pochvy raznykh gorizontov na ee biologicheskuyu aktivnost', ammonifikatsiyu i denitrifikatsiyu* [Effect of Loosening and Aeration of Soil Horizons on Biological Activity, Ammonification and Denitrification]. *Izvestiya TSKhA*, iss. 3, pp. 33-41.

9. Khomyakov, D.M., Khusnetdinova, T.I., Egorov, V.S. & Kutuzova, I.A. (2025). *Opyt po okul'turivaniyu derново-podzolistykh pakhotnykh почв učebno-opytного pochvenno-ekologicheskogo tsentra MGU «Chashnikovo»* [Experience in Cultivating Sod-Podzolic Arable Soils at the Educational and Experimental Soil-Ecological Center of Moscow State University «Chashnikovo»]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*, vol. 80, no. 3, pp. 57-69. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-57-69.

10. Dzyuin, A.G. (2019). *Izmeneniye zapasov mineral'nogo azota v derново-podzolistoi suginistoi pochve* [Changes in Mineral Nitrogen Reserves in Sod-Podzolic Loamy Soil]. *Agrokhimicheskii vestnik*, no. 6, pp. 30-33. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10086.

11. Shevchenko, V.A., Soloviyov, A.M. & Popova, N.P. (2024). *Azotnyi rezhim osvivaemykh derново-podzolistykh почв Nечерноземья v zernoparashnom plodosmennom sevooborote pri raznykh sistemakh udobrenii i obrabotki* [Nitrogen Regime of Newly Developed Sod-Podzolic Soils of the Non-Chernozem Zone in a Grain-Row Crop Rotation under Different Fertilization and Tillage Systems]. *Prirodobustroistvo*, no. 5, pp. 28-36. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-28-36.

12. Makarov, I.B., Balabko, P.N., Basevich, V.F., Karпова, D.V. & Khusnetdinova, T.I. (2018). *Okul'tivaniye podzolistykh почв: aktual'nye aspekty* [Cultivation of Podzolic Soils: Current Aspects]. *Agrokhimicheskii vestnik*, no. 2, pp. 6-8.

13. Sychev, V.G., Shafran, S.A., Anisk, D.M. et al. (2009). *Osnovnye napravleniya issledovaniy po agrokhimii azota v sovremenном zemledelii* [Main Areas of Research on Nitrogen Agrochemistry in Modern Agriculture]. *Byulleten' Geograficheskoi seti opytov s udobreniyami*, no. 6, 76 p., Moscow, VNIIA.

14. Gamzikov, G.P. (2014). *Sistemnyi kompleksnyi podkhod v agrokhimicheskikh issledovaniyakh biogennykh elementov v agrosenozakh (na primere azota)* [A Systemic Integrated Approach in Agrochemical Studies of Biogenic Elements in Agroecosystems: The Case of Nitrogen]. *Agrokhimiya*, no. 8, pp. 3-16.

15. Kayumov, M.K. (1989). *Programmirovaniye urozhayev sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Programming Crop Yields]. Moscow, Agropromizdat.

16. Shevchenko, V.A., Soloviyov, A.M., Bondareva, G.I. et al. (2021). *Bezопасное ispol'zovanie organicheskikh otkhodov svinovodcheskikh komplekсов pri вовлечении v оборот zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya: metodicheskie rekomendatsii* [Safe Use of Organic Waste from Pig-Breeding Complexes When Involving Agricultural Lands in Circulation: Methodological Recommendations], Moscow, VNIIGiM im. A.N. Kostyakova. DOI: 10.37738/VNIIGIM.2021.77.10.001.

17. Dospekhov, B.A. (1985). *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methodology of Field Experiment: With the Basics of Statistical Processing of Research Results], 5th ed., revised and enlarged, Moscow, Agropromizdat.

