

Российская академия наук

А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева

**АЗОТ В АГРОСИСТЕМЕ
НА ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ**

(К 125-летию экспедиции В.В. Докучаева в Каменную Степь)

Москва 2018

УДК 631.84
ББК 40.84
3132

Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я.

3132 Азот в агроecosистеме на черноземных почвах. – М.: РАН, 2018. – 180 с.
ISBN 978-5-906906-79-3

Черноземы России богаты углеродом и азотом, обладают активным сообществом микроорганизмов, являются уникальным природным реактором трансформации азотсодержащих веществ по всему почвенному профилю. Подтипы черноземов отличаются по содержанию, запасам и подвижности различных форм азота. Микробное сообщество играет важную роль в образовании и накоплении соединений азота в черноземных почвах. Накопление азотсодержащих органических соединений в черноземах и активность гидролитических ферментов азотного обмена определяют уровень их плодородия и устойчивости. Длительное использование черноземных почв ведет к потерям содержания и запасов гумуса и азота. По динамике изменений запасов минерального азота в почве определяют обеспеченность возделываемых культур азотом, уровень их продуктивности и качество урожая. Оптимизация содержания гумуса и азота в черноземных почвах достигается системой севооборотов, системой обработки почвы и системой применения органических и минеральных удобрений. При выращивании сельскохозяйственных культур на черноземных почвах растения используют 33-42% азота удобрения, в почве закрепляется 22-36%, газообразные потери азота достигают 20-36% от применяемой дозы. При внесении органических удобрений (меченных ¹⁵N) растения используют меньше азота удобрения, меньше его теряется и больше закрепляется в почве по сравнению с азотными минеральными удобрениями. Органические удобрения повышают устойчивость агроecosистем на черноземных почвах. Экологические аспекты потоков азота в ecosистемах на черноземных почвах затрагивают изменение азотного режима почв при подкислении, потери азота в процессе водной эрозии и его газообразные потери (в том числе эмиссию парниковых газов), а также загрязнение природных вод и продукции нитратами.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов в области почвоведения, агрохимии, земледелия и экологии, студентов и преподавателей высших учебных заведений, специалистов сельскохозяйственных предприятий.

Ключевые слова: азот, черноземные почвы, потоки азота, урожайность и качество продукции, экология, агроландшафт.

142 таблицы, 8 рисунков, библиография – 416 источников.

ISBN 978-5-906906-79-3

© Завалин А.А., Соколов О.А.,
Шмырева Н.Я., 2018

Russian Academy of Sciences

A. A. Zavalin, A. A. Sokolov, N. J. Shmyreva

**NITROGEN IN AGRO-ECOSYSTEMS
ON CHERNOZEM SOILS**

**(To the 125th anniversary of the expedition V. Dokuchaev
in the Stone Steppe)**

Moscow 2018

UDC 631.84
BBK 40.84
Z132

Zavalin A. A., Sokolov O. A., Shmyreva N. J.

Z132 Nitrogen in agro-ecosystems on chernozem soils. M.: RAS, 2018. – 180 p.
ISBN 978-5-906906-79-3

The black soil of Russia is rich in carbon and nitrogen, have an active society of organisms, are unique natural reactor of transformation of nitrogen-containing substances across the soil profile. Sub-types of chernozems differ in content, volume, and mobility of different forms of nitrogen. The microbial community plays an important role in the formation and accumulation of nitrogen compounds in Chernozem soils. Accumulation attester containing organic compounds in the black soil and the activity of hydrolytic enzymes of nitrogen metabolism determine their level of fertility and stability. Prolonged use of Chernozem soils leads to a loss of the content and reserves of humus and nitrogen. On the dynamics of changes of reserves of mineral nitrogen in the soil determine the security of crops with nitrogen, the level of their productivity and crop quality. Optimization of the humus content and nitrogen in Chernozemic soils is achieved with system of crop rotation, tillage system and application of organic and mineral fertilizers. At cultivation of crops on Chernozem soils plants use 33-42% of the nitrogen fertilizer in the soil is fixed 22-36%, gaseous losses of nitrogen reach 20-36% of the applied dose. With the addition of organic fertilizer (15N labelled) the plants use less nitrogen fertilizer, less is lost and more is fixed in the soil compared to nitrogen fertilizers. Organic fertilizers improve the stability of agro-ecosystems on Chernozem soils. Ecological aspects of nitrogen fluxes in ecosystems on Chernozem soils affect the changes of nitrogen regime of soils upon acidification, the loss of nitrogen in the process of water erosion and gaseous losses (including greenhouse gas emissions) and pollution of natural waters and products with nitrates.

The book is designed for a wide range of experts in the field of soil science, Agrochemistry, agriculture and the environment, students and teachers of higher educational institutions, specialists of agricultural enterprises.

Key words: nitrogen, black soil, nitrogen fluxes, productivity and product quality, ecology, agricultural landscape.

Table – 142, figures – 8, bibliography – 416 sources.

ISBN 978-5-906906-79-3

© Zavalin A. A., Sokolov O. A.,
Shmyreva N. J., 2018

Содержание

| | |
|---|-----|
| Введение..... | 6 |
| Глава 1. Азотный фонд и плодородие черноземов..... | 8 |
| Глава 2. Динамика развития азотного пула черноземных почв..... | 27 |
| Глава 3. Пути управления азотным режимом черноземных почв..... | 43 |
| 3.1. Азотный режим черноземов при применении удобрений..... | 43 |
| 3.2. Иммобилизация азота удобрений в черноземных почвах..... | 51 |
| 3.3. Система основной обработки и азотный режим черноземных почв..... | 60 |
| 3.4. Влияние растительных остатков (и соломы) на азотный режим черноземных почв..... | 70 |
| 3.5. Потребление азота растениями..... | 78 |
| 3.6. Потребление и использование азота удобрений и азота черноземных почв растениями..... | 92 |
| 3.7. Использование азота растениями с различных глубин почвенного профиля черноземов..... | 97 |
| 3.8. Эффективность применения азотных удобрений на черноземных почвах..... | 101 |
| Глава 4. Экологические аспекты потоков азота на черноземах..... | 109 |
| 4.1. Участие микроорганизмов в формировании плодородия и экологической функции черноземных почв..... | 109 |
| 4.2. Потоки азота при водной эрозии черноземных почв..... | 116 |
| 4.3. Газообразные потери азота и эмиссия N ₂ O черноземными почвами..... | 121 |
| 4.4. Экологические последствия подкисления черноземных почв..... | 125 |
| 4.5. Потоки азота в природных водах в зоне черноземов..... | 131 |
| 4.6. Получение экологически безопасной продукции при выращивании сельскохозяйственных культур на черноземных почвах..... | 135 |
| Заключение..... | 142 |
| Литература..... | 155 |

Введение

Российская Федерация располагает более чем половиной мировых черноземов [Иванов, 2015]. Черноземы занимают 50% пахотного фонда России, на них производится почти 75% валовой продукции зерновых культур и 50% продукции животноводства [Научные основы..., 2013; Агропромышленный комплекс, 2016]. Сохранение и повышение плодородия черноземов является основой роста продуктивности и устойчивости земледелия. В.В. Докучаев дал обстоятельную характеристику наиболее важным мелиоративным и агрономическим мероприятиям по поддержанию и повышению плодородия черноземных почв: «Характер земледельческой культуры, способ обработки почвы, культурные земледельские растения, сорта удобрений и вообще весь способ земледелия должны быть существенно различны по отдельным полосам России, должны быть строго приурочены к естественно-историческим условиям тех или других физико-географических районов России» [Докучаев, 1949, т. VII, с. 422]. Содержание гумуса («изогумусовые полосы» В.В. Докучаева) изменяется в черноземах в зависимости от «распределения фосфора и азота» [Вернадский, 1988, с. 344].

Д.Н. Прянишников [1945] считал, что «главным условием, определяющим высоту урожая в разные эпохи, была степень обеспеченности сельскохозяйственных растений азотом». И.В. Тюрин [1965] подчеркивал, что «всю эволюцию жизни на земле, с которой связано развитие почвенного покрова, нельзя мыслить, не учитывая процессов ассимиляции и диссимиляции (круговорота) азота и постепенной его аккумуляции в связанной форме органических веществ в растениях и почвах».

Интенсивность и направленность потоков азота определяют степень его участия в формировании плодородия почв и в продукционном процессе сельскохозяйственных культур. Важность проблемы азота в плодородии почвы и азотном питании растений определяется тем, что основная часть почвенного азота входит в состав гумуса (70-90% от общего количества) и растений (70-80%).

Азот является основным элементом питания растений. Основная масса его сосредоточена в органическом веществе почвы. Запасы гумуса характеризуют количество и состав почвенных соединений азота. Логично возникает ряд вопросов: что определяет уровень накопления азота в почве в органической форме? Почему для каждого типа почвы существует «свой потолок» накопления азота? Каковы механизмы гомеостаза уровня азота в почве? Ответы на эти вопросы позволили бы понять механизмы направленности потоков азота в системе «почва-растение», оптимизировать транс-

формацию азота в почве, снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Начало интенсивного использования (распашки) черноземов России относится к концу XVIII – началу XIX столетия. Комплексное изучение черноземов начато экспедициями В.В. Докучаева.

В настоящей работе предпринята попытка обобщить исследования черноземов России за более чем 100-летний период, особое внимание уделено следующим направлениям:

- азотный фонд и плодородие черноземов;
- динамика развития азотного пула черноземных почв;
- пути управления азотным режимом черноземных почв;
- экологические аспекты потоков азота на черноземах.

Глава 1. Азотный фонд и плодородие черноземов

Запасы азота являются одним из важнейших показателей потенциально-го плодородия почв. Азот в почве на 97-98% представлен органическими соединениями и на 1-3% минеральными. Наибольшие запасы азота сосредоточены в торфяно-болотных почвах (табл. 1). Из черноземов наибольшее количество азота содержится в выщелоченных подтипах, минеральные – в южных почвах. В метровом слое максимальное количество азота находится в черноземах обыкновенных (до 28 т/га). К северу и югу от зоны их распространения запасы азота снижаются.

В обыкновенном черноземе Каменной Степи (Косимая залежь с 1985 г. и пашня с 1971 г., Воронежская обл.), содержание гумуса и азота снизилось по всему профилю почвы (табл. 2).

Таблица 1. Запасы общего азота в почвах России, т/га
[Шконде и др., 1974; Адрихин, Щербаков, 1974; Хазиев, Наумов, 1979; Гамзиков, 1981; Лукин и др., 2011; Минакова и др., 2016]

| Почва | Слой, см | |
|---------------------------------------|----------|-------|
| | 0-20 | 0-100 |
| Дерново-подзолистые | 3-4 | 5-7 |
| Торфяно-болотные | 10-12 | 40-45 |
| Серые лесные | 3-7 | 7-18 |
| Черноземы оподзоленные и выщелоченные | 8-9 | 24-25 |
| Черноземы обыкновенные и типичные | 7-8 | 19-28 |
| Черноземы южные | 5-6 | 17-18 |
| Каштановые | 3-6 | 9-18 |

Таблица 2. Валовой гумус и общий азот в обыкновенном черноземе
[Щербаков, Годунов, 1978]

| Угодье | Слой, см | Гумус | | Азот | | C:N |
|--------------------------------|----------|-------|------|------|------|------|
| | | % | т/га | % | т/га | |
| Залежь (ковыльно-разнотравная) | 0-10 | 10,3 | 112 | 0,59 | 6,4 | 10,1 |
| | 20-30 | 6,9 | 80 | 0,39 | 4,5 | 10,2 |
| | 40-50 | 5,6 | 73 | 0,30 | 3,9 | 10,8 |
| | 60-70 | 2,8 | 38 | 0,17 | 2,3 | 9,5 |
| | 80-90 | 1,6 | 23 | 0,11 | 1,5 | 8,5 |
| Пашня | 0-10 | 7,1 | 77 | 0,39 | 4,2 | 10,5 |
| | 20-30 | 6,9 | 80 | 0,39 | 4,5 | 10,3 |
| | 40-50 | 4,1 | 53 | 0,23 | 3,1 | 10,4 |
| | 60-70 | 2,4 | 33 | 0,11 | 1,9 | 12,7 |
| | 80-90 | 0,7 | 11 | 0,07 | 1,1 | 6,0 |

Длительная распашка обыкновенного чернозема привела к снижению содержания общего азота на 34% в верхнем (10 см) слое почвы и не изменила его количества в слое 20-30 см [Щербаков, Годунов, 1978]. С потерей органического вещества ухудшаются физические, физико-химические и водные свойства обыкновенного чернозема.

Запасы азота в пахотном слое повышались у всех подтипов черноземных почв в восточном направлении (табл. 3). Что касается метрового слоя, то эта закономерность сохранялась у оподзоленных и типичных черноземов. У обыкновенного и южного черноземов запасы азота менялись незначительно. Более высокое количество азота в сибирских почвах, по-видимому, связано с менее продолжительной распаханностью.

Длительные процессы взаимодействия факторов почвообразования (рельеф, климат, гидрология, растительность, материнская порода, биота) обусловили формирование на территории Кубани большого разнообразия почв. Анализируя почвенный покров Кавказа, В.В. Докучаев [1948] отмечал, что «подобного разнообразия почвенных типов и думать нечего встретить ни в Европейской России, ни в Западной Европе».

Таблица 3. Запасы азота в черноземах ЦЧР, Предуралья и Западной Сибири т/га [Щербаков, 1978; Гамзиков, 1981; Хазиев, 1982]

| Чернозем | ЦЧР | | Предуралье | | Западная Сибирь | |
|--------------|---------|----------|------------|----------|-----------------|----------|
| | 0-20 см | 0-100 см | 0-20 см | 0-100 см | 0-10 см | 0-100 см |
| Оподзоленный | 6,5 | 21,0 | 10,8 | 29,6 | 10,7 | 28,0 |
| Выщелоченный | 7,4 | 24,0 | 11,3 | 28,0 | 9,1 | 22,0 |
| Типичный | 9,0 | 33,0 | 12,0 | 35,1 | - | - |
| Обыкновенный | 7,7 | 23,0 | - | - | 8,3 | 24,0 |
| Южный | 5,8 | 18,0 | - | - | 6,0 | 17,8 |
| Карбонатный | - | - | 9,8 | 31,6 | - | - |

Содержание азота в черноземных почвах колеблется в широких пределах от 0,087% в черноземовидной глинисто-песчаной почве (Галле, Германия), до 0,643% в выщелоченном тяжелосуглинистом черноземе (Мордовия, Россия). Высоким содержанием азота отличается деградированный чернозем – 0,439% (Красноярск, Россия) [Шевцова, 1998].

Обыкновенный чернозем (Краснодарский край) по запасам гумуса в пахотном слое не уступает другим подтипам черноземов [Симакин, 1983]. Однако по содержанию общего азота и его запасам в слое 0-150 см обыкновенный чернозем уступает типичным и выщелоченным подтипам (табл. 4). Отношение углерода гумуса к азоту колеблется в пределах 7,0-8,5%.

Таблица 4. Содержание и запас общего азота в черноземах Западного Предкавказья [Симакин, 1969]

| Чернозем | Слой | | |
|--------------|-----------|------------|------------|
| | 0-20 см | | 0-150 см |
| | азот, % | азот, т/га | азот, т/га |
| Обыкновенный | 0,29-0,40 | 7,0-8,3 | 32-35 |
| Типичный | 0,20-0,40 | 8,0 | 35-40 |
| Выщелоченный | 2,25-0,35 | 7,9-8,2 | 38-40 |

Изменение содержания азота по профилю черноземных почв идет параллельно изменению количества углерода (табл. 5). Однако снижение содержания азота с глубиной идет несколько в меньшей степени, чем содержание углерода, что приводит к сужению соотношения C:N.

Таблица 5. Содержание углерода, азота и соотношение C:N по слоям профиля черноземных почв [Шевцова, 1998]*

| Вариант | Слой почвенного профиля, см | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 0-20 | 20-40 | 40-60 | 60-80 | 80-100 |
| Черкасская опытная станция | | | | | |
| Контроль | 1,78/0,159 11,2 | 1,69/0,150 11,3 | 1,44/0,127 11,3 | 0,98/0,098 10,0 | 0,78/0,081 9,6 |
| Навоз | 1,79/0,162 11,0 | 1,70/0,144 11,8 | 1,56/0,135 11,6 | 1,17/0,104 11,3 | 0,91/0,086 10,6 |
| 2NPK | 1,88/0,160 11,8 | 1,91/0,166 11,5 | 1,55/0,133 11,7 | 1,21/0,113 10,7 | 1,05/0,109 9,6 |
| Навоз+NPK | 1,76/0,159 11,0 | 1,75/0,169 10,4 | 1,32/0,168 7,8 | 1,07/0,104 10,3 | 0,81/0,090 9,0 |
| Мордовская опытная станция | | | | | |
| Контроль | 5,49/0,537 10,2 | 4,86/0,480 10,1 | 2,58/0,305 8,5 | 1,65/0,208 7,9 | 1,17/0,134 8,7 |
| Навоз | 5,38/0,633 8,5 | 4,76/0,530 9,0 | 3,00/0,358 8,4 | 1,75/0,203 8,6 | 1,11/0,124 9,0 |
| NPK | 5,50/0,601 9,2 | 4,43/0,532 8,3 | 3,22/0,371 8,7 | 2,37/0,210 11,3 | 1,74/0,163 10,7 |
| Алтайский НИИЗиС | | | | | |
| Контроль | 3,60/0,305 11,8 | 2,79/0,267 10,4 | 1,74/0,156 11,2 | 1,03/0,109 9,5 | 0,60/0,061 9,8 |
| Навоз | 3,65/0,308 11,9 | 3,16/0,255 12,4 | 1,96/0,169 11,0 | _____ | _____ |
| NPK | 3,79/0,300 12,6 | 3,08/0,282 10,9 | 1,98/0,185 10,7 | _____ | _____ |

* В числителе: содержание C, % к массе воздушно-сухой почвы; в знаменателе: содержание N, % к массе воздушно-сухой почвы; целое число – отношение C:N.

Черноземы Предуралья (Башкортостан) по своим свойствам мало отличаются от черноземов ЦЧР. Однако, для черноземов Предуралья характерным является то, что азот в них сосредоточен в основном в слое 0-50 см (табл. 6).

Таблица 6. Запасы азота в черноземных почвах Башкирии [Хазиев, Агафарова, 1977]

| Чернозем | Азот в почвенном профиле, т/га | Азот в слое почвы 0-50 см | |
|--------------|--------------------------------|---------------------------|-------|
| | | т/га | % |
| Оподзоленный | 23,0-28,4 | 15,5-21,1 | 67-74 |
| Выщелоченный | 19,7-38,6 | 12,7-23,9 | 64-62 |
| Типичный | 28,6-51,4 | 20,9-22,4 | 73-44 |
| Карбонатный | 21,1-50,4 | 18,0-25,9 | 85-51 |

По запасам общего азота в этом слое черноземы Предуралья значительно превосходят черноземы ЦЧР [Адерихин, Щербаков, 1974]. Это связано с особыми условиями гумификации растительных остатков в Южно-Уральском регионе, которые обусловили неглубокое проникновение корневых систем растений и слабую миграцию продуктов гумификации [Хазиев, Агафарова, 1977].

Содержание и запас гумуса и азота в черноземах Восточной Сибири убывают в ряду подтипов: оподзоленные-выщелоченные-обыкновенные-южные (табл. 7). Соотношение C:N сужается в этом же ряду вследствие

изменения содержания гуминовых кислот в этих почвах. Наиболее узкое оно в черноземах в Минусинской впадине из-за усиленной минерализации органического вещества. Состояние гумуса в черноземах Восточной Сибири и черноземов Русской равнины достаточно близкое. Отличие черноземов Восточной Сибири состоит в уменьшении гумусового профиля и меньших запасах гумуса, в повышенном содержании гумуса и азота в пахотном слое в более узком соотношении C:N и $C_{гк}:C_{фк}$ [Бугаков и др., 1998].

Таблица 7. Содержание и запас гумуса и азота в черноземах Восточной Сибири [Бугаков и др., 1998]

| Чернозем | Гумус | | Азот | | C:N |
|--------------|-----------|---------|-----------|----------|-----------|
| | % | т/га | % | т/га | |
| Оподзоленный | 10,3-11,6 | 194-217 | 0,51-0,59 | 9,5-11,1 | 10,9-12,2 |
| Выщелоченный | 8,4-9,8 | 174-184 | 0,47-0,56 | 8,9-10,7 | 10,3-11,6 |
| Обыкновенный | 7,5-8,5 | 140-164 | 0,36-0,50 | 6,7-9,3 | 9,1-11,6 |
| Южный | 4,9 | 93 | 0,33 | 6,0 | 8,6 |

Азот, входящий в состав органического вещества и определяющий основную запас его в почве, находится в различной форме связей с его молекулами, что определяет степень их подвижности (табл. 8). Так, почвы с низким уровнем естественного плодородия (дерново-подзолистые) отличаются от почв с высоким уровнем (черноземы) не только по содержанию органического вещества, но и по его фракционному составу [Руделёв, 1992]. Для дерново-подзолистых почв характерно относительное накопление азота в фульвокислотах (39,8% от общего азота), что обеспечивает более высокую его мобильность. Для черноземов характерно относительно высокое содержание гуминовых соединений (преимущественно во 2-й фракции). У чернозема типичного содержится большее количество азота негидролиземого остатка (36,6% от общего азота).

Таблица 8. Распределение азота почвы по группам и фракциям органического вещества дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного [Руделёв, 1992]

| Почва, регион | Азот | Гуминовые кислоты | | | | Фульвокислоты | | | | | Негидролизуемый остаток | ГК, ФК |
|---|---------------|-------------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------------------|--------|
| | | Фракции | | | Сумма г. к. | Фракции | | | | Сумма ф. к. | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | 1а | 1 | 2 | 3 | | | |
| Дерново-подзолистая, суглинистая, Московская обл. | 118,1/ 100 | 14,4/ 12,2 | 2,7/ 2,3 | 4,4/ 3,7 | 21,5/ 18,2 | 9,5/ 8,0 | 17,3/ 14,6 | 4,3/ 3,6 | 16,0/ 13,5 | 47,1/ 39,8 | 32,3/ 27,3 | 0,45 |
| Чернозем типичный, Курская обл. | 270,0/ 100 | 8,9/ 3,3 | 77,3/ 28,6 | 22,4/ 8,3 | 108,6/ 40,2 | 12,6/ 4,7 | 21,5/ 7,9 | 5,1/ 1,9 | 20,4/ 7,6 | 59,6/ 22,1 | 98,7/ 36,6 | 1,82 |

Числитель: мг 100 г почвы; знаменатель: % от общего азота.

Основным источником обеспеченности растений азотом является активный пул органического вещества черноземов. Время его существования – 3-10 лет [Семенов, Когут, 2015]. Содержание в черноземе выщелоченном углерода потенциально минерализуемого органического вещества достоверно (на уровне 0,76) коррелировало с размерами нетто-минерализации азота [Кузнецова и др., 2006]. Повышение обеспеченности почвы активным органическим веществом на 10 мг/100 г позволяет поднять содержание минерального азота на 0,11 мг/100 г.

Между содержанием гумуса и азота почвы существует тесная связь, поскольку основная его часть входит в состав гумусовых веществ [Тюрин, 1965; Орлов, 1985]. Преобладающей формой в органическом веществе является азот гуминов. В черноземах на подвижные соединения азота приходится 4% от общих его запасов. Соединения органического азота в основном представлены аминокислотами, которые в почве находятся в связанном состоянии.

В форме аминокислот находится одна треть почвенного азота (табл. 9). Содержание аминокислот в черноземах колеблется в пределах 7- 10% от общего азота. Из выделенных аминокислот преобладают следующие: аланин, глицин, треонин, валин, аспарагиновая и гуталиновая кислоты.

Таблица 9. Формы соединений азота в почвах ЦЧЗ [Щербаков, Рудай, 1983]

| Почва | Азот, % от общего азота | | |
|--------------|-------------------------|---------------|----------------|
| | аммонийный | гексоаминовый | аминокислотный |
| Серые лесные | 21-33 | 6-9 | 32-37 |
| Черноземы | 12-24 | 7-10 | 19-31 |

Относительное содержание азота аминокислот в пахотном слое почв меняется в направлении, противоположном развитию процессов гумификации (минимальное количество в типичных и обыкновенных черноземах).

В черноземе типичном содержание аминокислот (АК) в пахотном слое колеблется в пределах 0,14-0,36%, запасы – 0,46-1,15 т/га, тогда как в целинной почве – 0,49% и 1,61 т/га соответственно [Фрунзе, 2015]. Фракция азота АК в почве пашни занимает значительную долю (10-22% от общего азота), в целинной почве – 31% и служит источником и резервом азота в питании рас-

тений [Щербаков, 1978; Фрунзе, 2014]. Наибольшую долю в запасе азота АК пахотного чернозема (47-67%) занимают шесть аминокислот (аланин, аспарагиновая кислота, глицин, аргинин, глутаминовая кислота и серин). Доля девяти АК (лизин, лейцин, пролин, треонин, гистидин, валин, изолейцин, цистин, фенилаланин) в формировании запаса азота АК составили 30-35%. Три аминокислоты (тирозин, У-аминомасляная кислота, метионин) принимали незначительное участие (2-4%) в образовании и накоплении азота АК. Долевое участие азота АК в формировании пула целинной почвы такое же, как и в пахотной, но в более высоких абсолютных величинах. Использование чернозема в течение 23 лет привело к снижению запаса азота АК в 2-3 раза.

Типичные черноземы ЦЧР отличаются наибольшим количеством минерального азота (130-160 кг/га в пахотном и 180-255 кг/га в 50-сантиметровом слое) и легкогидролизуемого азота (900-1250 кг/га в пахотном и 1550-1900 кг/га в 50-сантиметровом слое) (табл. 10).

Таблица 10. Запасы соединений азота в черноземах ЦЧР, кг/га [Шконде и др., 1974]

| Почвы | Минеральный азот | | Легкогидролизуемый азот | | Трудногидролизуемый азот | |
|------------------------|------------------|---------|-------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| | 0-25 см | 0-50 см | 0-25 см | 0-50 см | 0-25 см | 0-50 см |
| Черноземы оподзоленные | 100-125 | 150-210 | 650-930 | 900-1400 | 1100-1700 | 1650-2520 |
| Черноземы выщелоченные | 110-130 | 140-205 | 750-890 | 950-1500 | 1300-1600 | 1760-2400 |
| Черноземы типичные | 130-160 | 180-255 | 900-1250 | 1550-1900 | 1500-1900 | 1760-2550 |
| Черноземы обыкновенные | 90-110 | 125-190 | 580-750 | 820-1450 | 1200-1550 | 1750-2550 |
| Черноземы южные | 65-90 | 85-115 | 350-450 | 500-650 | 1150-1400 | 1600-2100 |

Гумусо-аккумулятивный горизонт типичного чернозема заповедника «Белогорье» отличался наибольшим количеством легкогидролизуемого азота (301 мг/кг) (табл. 11). Весь почвенный профиль чернозема типичного также отличался повышенным содержанием этой формы азота [Лукин, 2011].

Таблица 11. Содержание общего и легкогидролизуемого азота в почвах естественных ландшафтов заповедника «Белогорье» [Лукин, 2011]

| Горизонт | Мощность горизонта, см | Глубина отбора, см | Общий азот, % | Легкогидролизуемый азот, мг/кг |
|--|------------------------|--------------------|---------------|--------------------------------|
| Чернозем выщелоченный мощный тучный (участок «Ямская степь») | | | | |
| A1 | 7-45 | 10-20 | 0,41 | 284 |
| AB | 46-68 | 50-60 | 0,15 | 151 |
| B | 69-90 | 70-80 | 0,10 | 112 |
| BC | 91-120 | 100-110 | 0,06 | 91 |
| C | 121-165 | 140-150 | 0,03 | 39 |
| Чернозем типичный мощный тучный (участок «Ямская степь») | | | | |
| A1 | 7-47 | 10-20 | 0,38 | 301 |
| | | 30-40 | 0,29 | 216 |
| ABca | 48-75 | 55-65 | 0,28 | 180 |
| Bca | 76-98 | 80-90 | 0,22 | 118 |
| BCca | 99-120 | 105-115 | 0,13 | 108 |
| Cca | 121-165 | 150-160 | 0,03 | 55 |

Наибольшая подвижность соединений азота характерна для оподзоленных и выщелоченных черноземов ЦЧР, в которых содержится больше минеральных (1,0 – 3,0%) и легкогидролизующихся (6 – 10%) форм (табл. 12).

Таблица 12. Формы соединений азота в черноземах ЦЧР [Щербаков, Рудай, 1983]

| Чернозем | Азот общий, % | Азот, % от общего азота | | | |
|--------------|---------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| | | минеральный | легкогидролизующийся | трудногидролизующийся | негидролизующийся |
| Оподзоленный | 0,21-0,37 | 1,0-1,8 | 8-10 | 13-20 | 69-79 |
| Выщелоченный | 0,29-0,41 | 1,1-3,0 | 6-8 | 13-17 | 74-80 |
| Типичный | 0,31-0,51 | 0,6-1,7 | 5-8 | 12-15 | 75-82 |
| Обыкновенный | 0,31-0,41 | 0,3-2,5 | 5-7 | 12-16 | 78-81 |
| Южный | 0,21-0,33 | 0,7-0,9 | 5-6 | 18-28 | 65-75 |

В типичных и обыкновенных черноземах низкое содержание гидролизующихся соединений азота обусловлено составом гумуса, в котором преобладает циклическая форма гуминовых кислот и фракция инертных гуминов. Для черноземов лесостепи Поволжья (Ульяновская обл.) характерна высокая доля трудногидролизующихся соединений (26%) и низкая доля легкогидролизующегося (6%) и негидролизующегося азота (68%) [Узун, Алексеева, 1973; Сатаров, 1999]. Оподзоленные черноземы Красноярского лесостепного округа содержат больше гумуса (11,3%), но их гумус беднее по сравнению с Канскими черноземами (гумус 9,7%, CN = 12) [Танделов, 1998].

При длительном использовании обыкновенного чернозема снижается абсолютное количество фракций азота по всему профилю почвы (табл. 13).

Таблица 13. Формы азотных соединений в обыкновенном черноземе Каменной Степи [Щербаков, Годунов, 1978]

| Слой, см | Азот | | | | | | | | |
|----------|--------------|-------------|-----|----------------------|-----|-----------------------|------|-------------------|----|
| | общий, мг/кг | минеральный | | легкогидролизующийся | | трудногидролизующийся | | негидролизующийся | |
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Залежь | | | | | | | | | |
| 0-10 | 5900 | 46 | 0,8 | 301 | 5,1 | 930 | 15,7 | 4623 | 78 |
| 20-30 | 3900 | 20 | 0,5 | 257 | 6,6 | 597 | 15,3 | 3026 | 78 |
| 40-50 | 3000 | 10 | 0,3 | 143 | 4,8 | 435 | 14,5 | 2412 | 80 |
| 60-70 | 1700 | 7 | 0,4 | 78 | 4,6 | 256 | 15,0 | 1359 | 80 |
| 80-90 | 1060 | Сл. | - | 38 | 3,6 | 195 | 18,4 | 827 | 78 |
| Пашня | | | | | | | | | |
| 0-10 | 3900 | 11 | 0,3 | 260 | 6,7 | 484 | 12,4 | 3145 | 81 |
| 20-30 | 3900 | 11 | 0,3 | 265 | 6,8 | 465 | 11,9 | 3159 | 82 |
| 40-50 | 2400 | 14 | 0,6 | 154 | 6,4 | 363 | 15,1 | 1869 | 78 |
| 60-70 | 1400 | 7 | 0,5 | 80 | 5,7 | 207 | 14,8 | 1106 | 79 |
| 80-90 | 760 | 7 | 0,9 | 21 | 2,8 | 119 | 15,6 | 613 | 81 |

Примечание: в графе 1 – мг/кг, 2 – %.

При этом возрастает относительное количество негидролизуемого азота, что наиболее заметно в верхнем слое почвы 0-30 см. Усиление мобилизационных процессов повысило миграцию легкогидролизуемого азота в глубокие слои почвенного профиля.

Основная часть азота в черноземах Пензенской области представлена органическими соединениями (98 – 99%) (табл. 14)

Таблица 14. Формы азота в черноземных почвах Пензенской области [Власова, 1999]

| Угодья | Слой, см | N общий, % | N минеральный | N органических соединений | | |
|---------------------|----------|------------|---------------|---------------------------|----------------------|-----------------|
| | | | | легко гидролизуемый | трудно гидролизуемый | негидролизуемый |
| Поперечинская степь | 0-25 | 0,590 | 17,7 0,3 | 365,8 6,2 | 997,1 16,9 | 4519,4 76,6 |
| Целина | 30-60 | 0,372 | 7,4 0,2 | 193,4 5,2 | 718,0 19,3 | 2801,2 75,3 |
| Поперечинская степь | 0-25 | 0,434 | 21,7 0,5 | 386,3 8,9 | 937,0 21,6 | 2994,6 69,0 |
| Пашня | 30-60 | 0,347 | 10,4 0,3 | 221,1 6,4 | 707,9 20,4 | 2529,6 72,9 |
| Кустарниковая степь | 0-25 | 0,515 | 20,6 0,4 | 360,5 7,0 | 927,0 18,0 | 3841,9 74,6 |
| Целина | 30-60 | 0,355 | 10,7 0,3 | 213,0 6,0 | 699,4 19,7 | 2627,0 74,0 |
| Кустарниковая степь | 0-25 | 0,427 | 25,6 0,6 | 384,3 9,0 | 862,5 20,2 | 2997,5 70,2 |
| Пашня | 30-60 | 0,301 | 12,0 0,4 | 240,8 8,0 | 629,1 20,9 | 2128,1 70,7 |

* Числитель – мг/100 г почвы; знаменатель – % от общего азота.

Преобладающей формой органического азота является негидролизуемая форма (69-77%). На пашне содержание этой фракции снижается до 69-70% по сравнению с целиной (75-77%). При длительном использовании черноземов содержание трудногидролизуемой фракции снижается, а количество легкогидролизуемого азота повышается.

Азот в черноземах Башкирии представлен в основном негидролизуемыми соединениями (табл. 15).

Таблица 15. Содержание различных форм азота в черноземах Башкирии [Хазиев, Наумов, 1979]

| Чернозем | Азот, % от общего | | | |
|--------------|-------------------|--------------------|---------------------|-----------------|
| | минеральный | легкогидролизуемый | трудногидролизуемый | негидролизуемый |
| Опозоленный | 1,1-1,7 | 6-8 | 12-15 | 79-81 |
| Выщелоченный | 0,4-0,9 | 5-6 | 13-15 | 80-81 |
| Типичный | 0,7-0,9 | 5-6 | 11-12 | 80-82 |
| Обыкновенный | 1,0-1,3 | 5-6 | 12-13 | 80-81 |

На долю минерального азота приходится не более 2%, а на долю легкогидролизуемого – 5-8%. Наибольшей подвижностью обладает азот чернозема

оподзоленного. В черноземах Башкирии (пахотный слой) количество трудногидролизуемого азота составляет 154-728 мг/кг почвы.

В отличие от черноземов ЦЧР основные запасы азота в черноземах Западной Сибири (70% запасов гидролизуемого азота), сосредоточены в слое 0-50см [Гамзинов, 1981]. При длительном использовании черноземов (без применения органических и минеральных удобрений) наступает стабилизация соотношения азотосодержащих соединений по профилю, что свидетельствует о высокой устойчивости азотного фонда почв. Количество и запасы легкогидролизуемых азотосодержащих соединений коррелирует с содержанием гумуса и азота в почвах (табл. 16). Наибольшими запасами легкогидролизуемого азота обладает профиль типичного и обыкновенного черноземов, минимальное количество его характерно для южных черноземов.

Таблица 16. Запасы легкогидролизуемого азота в черноземах ЦЧР, кг/га

| Чернозем | Азот, определяемый по методу | | | |
|--------------|------------------------------|----------|-----------|----------|
| | Тюринга-Кононовой | | Корнфилда | |
| | 0-20 см | 0-100 см | 0-20 см | 0-100 см |
| Оподзоленный | 175 | 700 | 402 | 1200 |
| Выщелоченный | 170 | 900 | 426 | 1400 |
| Типичный | 196 | 1300 | 497 | 1800 |
| Обыкновенный | 176 | 1000 | 388 | 1300 |
| Южный | 133 | 600 | 282 | 900 |

Количество минерального азота в черноземах зависит от степени их окультуренности, их гранулометрического состава, запасов и состава гумуса и условий минерализации и иммобилизации органических соединений азота возделываемой культурой. Повышенным содержанием обменного аммония и нитратов отличается пахотный слой чернозема типичного и выщелоченного, минимальным – чернозем южный (табл. 17). В пахотном слое чернозема типичного содержится также большое количество фиксированного аммония. При длительном использовании почвы количество минерального азота возрастает. С глубиной содержание минерального азота в черноземах существенно снижается.

Прямое действие бобово-злаковых трав на плодородие почвы (в том числе азотный режим) оказывает не только симбиотический азот, но и оставшееся ими в почве органическое вещество (пожнивно-корневые остатки, мелкие корешки, клубеньки, корневые эксудаты). Поступающее в почву органическое вещество бобово-злаковых трав по своему экологически безопасному действию на свойства почвы превосходит навоз и минеральные удобрения и создает лучшие условия для формирования урожая последующих культур севооборота.

Таблица 17. Содержание минеральных соединений азота в черноземах ЦЧР [Щербаков, Рудай, 1983]

| Черноземы | Слой, см | Целина * | | | | Пашня | | | | Фиксированный N-NH ₄ , % от гуммы | Сумма минеральных соединений азота, мг/кг | Фиксированный N-NH ₄ , % от гуммы | |
|--------------|----------|--|-------------------|---------------------------------|-------------------|--|-------------------|---------------------------------|-------------------|--|---|--|------|
| | | Обменный N-NH ₄ +N- NO ₃ | | Фиксированный N-NH ₄ | | Обменный N-NH ₄ +N- NO ₃ | | Фиксированный N-NH ₄ | | | | | |
| | | мг/кг | % от общего азота | мг/кг | % от общего азота | мг/кг | % от общего азота | мг/кг | % от общего азота | | | | |
| Оподзоленный | 0-10 | 41 | 1,1 | 121 | 3,2 | 162 | 74,7 | 49 | 1,8 | 110 | 4,0 | 159 | 62,9 |
| | 20-30 | 27 | 1,0 | 120 | 4,2 | 147 | 81,6 | 46 | 1,8 | 123 | 4,9 | 169 | 71,8 |
| | 40-50 | 24 | 1,0 | 125 | 5,4 | 149 | 83,9 | 41 | 1,8 | 132 | 5,8 | 173 | 76,3 |
| | 80-90 | 15 | 1,4 | 114 | 10,5 | 129 | 88,4 | 17 | 1,2 | 139 | 9,9 | 156 | 89,0 |
| Выщелоченные | 0-10 | 51 | 1,3 | 144 | 3,8 | 195 | 73,8 | 45 | 1,5 | 129 | 4,2 | 174 | 74,1 |
| | 20-40 | 35 | 1,2 | 130 | 4,5 | 165 | 78,8 | 42 | 1,6 | 133 | 5,0 | 175 | 76,0 |
| | 40-50 | 23 | 1,1 | 127 | 6,0 | 150 | 84,5 | 32 | 1,5 | 130 | 6,2 | 162 | 82,0 |
| | 80-90 | 13 | 1,6 | 132 | 15,7 | 145 | 89,0 | 20 | 2,3 | 124 | 14,1 | 144 | 85,8 |
| Типичный | 0-20 | 50 | 1,0 | 163 | 3,4 | 213 | 76,5 | 62 | 1,8 | 127 | 3,6 | 189 | 67,2 |
| | 40-60 | 42 | 1,4 | 132 | 4,5 | 174 | 75,9 | 54 | 1,9 | 148 | 5,1 | 202 | 73,3 |
| | 80-100 | 30 | 1,6 | 131 | 6,9 | 161 | 81,4 | 25 | 1,8 | 140 | 10,0 | 165 | 84,8 |
| | 0-10 | 46 | 0,8 | 171 | 2,9 | 217 | 78,8 | 11 | 0,3 | 117 | 3,0 | 128 | 91,4 |
| Обыкновенный | 20-30 | 20 | 0,5 | 139 | 3,6 | 159 | 87,4 | 11 | 0,3 | 136 | 3,5 | 147 | 92,5 |
| | 40-50 | 10 | 0,3 | 130 | 4,3 | 140 | 92,9 | 14 | 0,6 | 135 | 5,6 | 149 | 90,6 |
| | 80-90 | следы | - | 137 | 12,9 | 137 | 100,0 | 7 | 0,9 | 116 | 15,3 | 123 | 94,3 |
| | 0-10 | 25 | 0,7 | 140 | 4,0 | 165 | 84,8 | 26 | 0,9 | 138 | 4,6 | 164 | 84,1 |
| Южный | 20-30 | 22 | 0,8 | 131 | 4,8 | 153 | 85,5 | 12 | 0,4 | 147 | 5,2 | 159 | 92,4 |
| | 40-50 | 20 | 1,0 | 125 | 6,1 | 145 | 86,2 | 10 | 0,6 | 142 | 8,3 | 152 | 93,4 |
| | 80-90 | 16 | 2,1 | 130 | 17,3 | 146 | 89,0 | 3 | 0,5 | 125 | 19,5 | 128 | 97,6 |

Преимущество бобовых культур состоит в том, что под них не требуется применение азотных удобрений; после них доза азота для последующей культуры снижается в 1,5-2 раза по сравнению с небобовыми предшественниками; они продуцируют самый дешевый, биологически полноценный белок [Трепачев, 1999].

В земледелии ЦЧР за 5-летний период (1986-1990 гг.) потреблено 117,4 тыс. тонн общего азота, в котором доля симбиотического азота составила 56% (65,3 тыс. тонн) [Ягодина, Азаров, 1998]. В последующее время количество поступающего биологического азота в земледелие снижалось, поскольку произошло снижение площадей бобовых культур [Завалин и др., 2007]. Симбиотический азот участвует во всех циклах превращения азота в агроэcosистеме. При выращивании бобово-злаковых трав на дерново-подзолистой почве потоки симбиотического азота распределились следующим образом: растения накапливали 33%, в почве закреплялось 38%, а потери достигали 29% от общего его количества в агроэcosистеме [Соколов и др. 2010]. Если условно принять это соотношение и для черноземных почв ЦЧР, закрепилось 75,2 тыс. тонн симбиотического азота (в 1,2 раза больше, чем его накопилось в урожае зернобобовых и бобовых культур), а его газообразные потери достигли 57,4 тыс. тонн (табл. 18).

Таблица 18. Потоки симбиотического азота в ЦЧР при выращивании зернобобовых, однолетних и многолетних бобовых трав

| Показатель | Симбиотический азот | |
|------------------------|---------------------|------------------------|
| | тыс. т | % от общего количества |
| Накопление в растениях | 65,8 | 33 |
| Иммобилизация в почве | 75,2 | 38 |
| Газообразные потери | 57,4 | 29 |
| Всего | 197,9 | 100 |

Эффективным приемом, обеспечивающим повышение запасов доступного азота в почве, является инокуляция семян злаковых культур биопрепаратами на основе штаммов ассоциативных азотфиксаторов. При инокуляции семян зерновых культур препаратами ассоциативных азотфиксаторов усиливается рост растений, повышается устойчивость к фитопатогенам, экологическим стрессам, увеличивается урожайность зерна на 3-4 ц/га [Шотт, 2007; Завалин, 2015]. Для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур используют ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* (группа PGPR, Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), у которых выявлена способность к фиксации азота благодаря наличию у них *nifH* гена [Минеев и др., 1991; Баронин, 1998; Безлер и др., 2016].

При интродукции в почву (чернозем выщелоченный, Воронежская обл.) штамма *P.fluorescens* 116 повышалось содержание щелочегидролизуемого азота на протяжении всего периода вегетации сахарной свеклы [Безлер и др., 2015]. При этом в почве повышалось содержание нитратного азота в первой половине вегетации свеклы, что обеспечило формирование более высокого урожая корнеплодов свеклы (на 42 ц/га или на 14% по отношению к контролю).

На черноземе выщелоченном и обыкновенном Западной Сибири микробными ассоциациями фиксируется 22–65 кг/га азота [Клевенская, 1982, 1991; Назарюк, 2004]. В частности, в ризоценозах пшеницы и ячменя азотфиксация составила 4,3–29,0 кг/га, в ризосфере дикорастущих трав – 22–32 кг/га [Клевенская, 1982; Родынюк, 1991].

В условиях обыкновенного чернозема (Днепропетровская обл.) с помощью метки $^{15}\text{N}_2$ установлено: при выращивании кукурузы несимбиотическая азотфиксация достигала 4,8 кг N/га [Гетманец, 1988]. При добавлении растительных остатков размеры фиксации азота возрастали до 5,8–8,9 кг N/га, т.е. в 1,5 раза.

Ведущую роль в повышении плодородия черноземов играют биологические факторы, поскольку микроорганизмы участвуют в целом ряде процессов, таких как азотфиксация, нитрификация, денитрификация, а также в минерализации органического вещества и иммобилизации минеральных соединений азота [Благодатский, Паников, 1989; Масютенко и др., 2009; Чимитдорожиева, Чимитдоржиева, 2013]. В зависимости от характера действия антропогенных и природных факторов меняется структура микробоценоза, изменяется развитие и соотношение микроорганизмов, тяготеющих к использованию к- или г- стратегии [Звягинцев и др., 2003; Благодатская и др., 1994; Мисютенко и др., 2009].

Так, в структуре общей биомассы залежи и пашни доминирует грибной мицелий: от 90% в верхних до 97% в нижних горизонтах чернозема выщелоченного (Нижегородская обл.) (табл. 19.). В структуре грибной биомассы в почве пашни больше доля спор (9% – в верхних горизонтах и 4% – в нижних). В почве залежи больше процент биомассы прокариотных микроорганизмов [Полянская и др., 2012].

Таблица 19. Структура микробной биомассы пахотных почв и почв залежи [Полянская и др., 2012]

| Глубина, см | Биомасса, % от общей биомассы микроорганизмов | | |
|--------------------------------------|---|-----------|----------------|
| | спор грибов | прокариот | мицелия грибов |
| Чернозем выщелоченный, пашня 10 лет | | | |
| 0-25 | 6,7 | 2,2 | 91,1 |
| 25-40 | 5,4 | 1 | 93,6 |
| 40-80 | 4 | 0,7 | 95,3 |
| 80-100 | 4 | 0,7 | 95,3 |
| Чернозем выщелоченный, залежь 10 лет | | | |
| 0-4 | 4,3 | 2,7 | 93 |
| 4-26 | 4,2 | 2,8 | 93 |
| 26-46 | 4,1 | 2,6 | 93,3 |
| 46-80 | 4,1 | 2,6 | 93,3 |
| 80-100 | 4,1 | 3,1 | 92,8 |
| Чернозем выщелоченный, пашня 16 лет | | | |
| 0-28 | 8,2 | 2,8 | 89 |
| 28-37 | 7,2 | 1,5 | 91,3 |
| 37-68 | 4,6 | 1,2 | 94,2 |
| 68-80 | 4,5 | 0,9 | 94,6 |
| 80-110 | 4,3 | 1,1 | 94,6 |

| Глубина, см | Биомасса, % от общей биомассы микроорганизмов | | |
|--------------------------------------|---|-----------|----------------|
| | спор грибов | прокариот | мицелия грибов |
| Чернозем выщелоченный, залежь 16 лет | | | |
| 0-5 | 6,3 | 2,1 | 91,6 |
| 5-34 | 6,2 | 2 | 91,8 |
| 34-78 | 4,8 | 1,7 | 93,5 |
| 78-110 | 4,8 | 1,7 | 93,5 |
| Чернозем выщелоченный, пашня 25 лет | | | |
| 0-25 | 8,7 | 2,4 | 88,9 |
| 25-48 | 7,6 | 1,2 | 91,2 |
| 48-82 | 7,1 | 1,8 | 91,1 |
| 82-100 | 5,8 | 1 | 93,2 |
| Чернозем выщелоченный, залежь 25 лет | | | |
| 0-9 | 3,5 | 3 | 93,5 |
| 9-19 | 3 | 2,9 | 94,1 |
| 19-82 | 3 | 2,8 | 94,2 |
| 82-100 | 3 | 2,8 | 94,2 |
| Дерново-карбонатные, пашня 10 лет | | | |
| 0-15 | 5 | 0,7 | 94,3 |
| 15-25 | 2,82 | 0,48 | 96,7 |
| 25-82 | 2,2 | 0,4 | 97,4 |
| 82-110 | 1,8 | 0,5 | 97,7 |

Изменения в структуре микробоценоза влияют на процессы мобилизации и иммобилизации азота почвы.

Гетеротрофная микрофлора временно выводит часть азота из сферы азотного питания растений, препятствует его потерям [Благодатский и др., 1994; Каличкин, Малыгин, 2005]. В этой связи целесообразно определение скорости оборачиваемости микробной биомассы для того, чтобы установить степень повторной минерализации иммобилизованного азота, что в первую очередь необходимо для определения доз и сроков применения азотных удобрений. Характер использования иммобилизованного азота растениями определяется величиной потока его через микробную биомассу, который пропорционален произведению запаса азота в биомассе на скорость ее оборачиваемости [Евдокимов и др., 1991; Шатохина и др., 2000; Каличкин, Малыгин, 2005]. Поэтому важным является представление об активности микроорганизмов и величине потока азота через микробную биомассу.

Действие удобрений на формирование биомассы почвенных микроорганизмов неоднозначно. Так, численность бактерий, актаномитетов и грибов в почве увеличивалась под действием органических и минеральных удобрений [Мишустин, 1972; Каутская, 1982; Михновская, 1982]. В то же время установлено, что под действием минеральных удобрений происходит снижение численности микроорганизмов в почве [Голобородько, Иутинская, 1978; Выблов, 1979; Павленко, 1982; Семенов и др., 2010].

Противоречивость данных вызвана тем, что степень влияния органических и минеральных удобрений на накопление микробной биомассы зависит

от ряда факторов: местоположения на местности, типа севооборота, мощности пахотного слоя и времени года [Масютенко и др., 2009]. Направленность изменения содержания микробной биомассы в черноземе типичном (Курская обл.) зависела от степени антропогенного воздействия. При максимальном антропогенном воздействии (бессменный пар) содержание биомассы микроорганизмов в 50-сантиметровом слое почвы снижалось в 2 раза по сравнению с залежью. Наибольшее количество микробной биомассы накапливалось в почве при выращивании озимой пшеницы в зернотравяном севообороте на южном склоне.

Содержание микробной биомассы снижалось по профилю почвы. Одной из причин явилось уменьшение запасов свежего органического вещества, служащего питательным субстратом для микроорганизмов. Бессменное парование в течение 23 лет привело к снижению биомассы микроорганизмов в 50-сантиметровом слое почвы по сравнению с залежью и севооборотом на 38% и 30% соответственно [Масютенко и др., 2009]. Содержание микробной биомассы в 20-сантиметровом слое почвы увеличивалось от мая к августу-сентябрю.

Активизация биологических систем почвы для реализации ее потенциального плодородия достигается за счет использования экологически безопасных технологий применения удобрений. Так, при органической системе удобрения (навоз 50 т/га под кукурузу, чернозем выщелоченный, Харьковская обл.) микроорганизмы азотного цикла получили наибольшее развитие (табл. 20). При этом в почве преобладающее развитие получили аммонификаторы и денитрификаторы [Шатохина и др., 2000]. Усиление процессов аммонификации и денитрификации снижает уровень содержания азота в почве [Кленов, Зайцева, 1996].

Применение под кукурузу навоза в дозе 50 т/га и полного минерального удобрения ($N_{90}P_{30}K_{30}$) вызывали снижение в 4,5 раза количества аммонификаторов и в 3,2 раза бактерий, использующих минеральный азот; анаэробных азотфиксаторов рода *Clostridium* – в 7 раз, аммонитрофилов – в 1,9 раза, денитрификаторов в 1,7 раза по сравнению с органической системой удобрения. Снижение дозы азотных удобрений до 60 кг/га уменьшило их ингибирующее действие на микрофлору азотного цикла.

Запасы азота микробной биомассы существенно возрастают во второй половине июня. Низкие запасы азота микробной массы в бессменном пару связаны с недостатком энергетического субстрата (растительных остатков) [Благодатский и др., 1992, 1994].

Наиболее интенсивный поток азота микроорганизмы обеспечивали в посевах бессменной пшеницы вследствие более высокой обеспеченности их энергетическим материалом (в том числе корневых выделений) (табл. 22). Имобилизация азота в микробных клетках является одним из важнейших факторов, снижающих потери азота из почвы. Запасы азота микроорганизмов в слое 0-10 см выщелоченного чернозема (Новосибирская обл.) достигают 17-61 кг/га.

Таблица 20. Численность основных физиологических групп бактерий азотного цикла чернозема южного [Шатохина и др., 2000]

| Культура севооборота | Аммонификаторы | Используемые минеральный азот | | Нитрифицирующие, тыс./г | Азотфиксирующие, % | Олигонитрофильные | | Денитрифицирующие | Анаэробные азотфиксаторы, тыс./г | Показатели | |
|----------------------|----------------|-------------------------------|--------|-------------------------|--------------------|-------------------|--------|-------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------|
| | | млн./г | млн./г | | | млн./г | млн./г | | | Микробной трансформации | Олиготрофности |
| Кукуруза | 50,9 | 54,3 | 3,74 | 51,0 | 93,2 | 4,8 | 48,6 | 98,7 | 86 | | |
| Ячмень | 27,1 | 97,6 | 2,58 | 39,6 | 95,0 | 1,1 | 29,2 | 32,6 | 77 | | |
| Горох | 2,6 | 20,8 | 0,82 | 56,0 | 23,2 | 5,2 | 0,2 | 2,9 | 98 | | |
| Подсолнечник | 12,0 | 11,1 | 1,25 | 32,1 | 22,3 | 0,8 | 1,8 | 24,8 | 100 | | |

Таблица 21. Динамика азота микробной биомассы в черноземе выщелоченном, кг/га [Каличкин, Малыгин, 2005]

| Вариант | Месяцы | | |
|--------------------|----------|----------|----------|
| | май | июнь | июль |
| Бессменный пар | 17+/-1,0 | 30+/-2,7 | 40+/-4,0 |
| Пар после люцерны | 24+/-3,0 | 30+/-3,0 | 43+/-4,3 |
| Бессменная пшеница | 24+/-1,0 | 43+/-5,0 | 43+/-5,0 |

Таблица 22. Динамика потока азота через микробную биомассу кг/га [Каличкин, Малыгина, 2005]

| Вариант | Месяц | | |
|--------------------|----------|----------|----------|
| | май | июнь | июль |
| Бессменный пар | 10+/-0,6 | 33+/-3,1 | 26+/-2,6 |
| Пар после люцерны | 29+/-3,1 | 56+/-5,6 | 46+/-4,5 |
| Бессменная пшеница | 20+/-0,8 | 77+/-9,5 | 79+/-9,0 |

Через микробную биомассу в почве проходит поток азота, в 2-3 раза превышающий ежегодный вынос его сельскохозяйственными культурами с урожаем [Бабьева, Зенова, 1989; Дмитриев, 1997; Полянская, 2012].

Процессы трансформации азота от высокомолекулярных органических соединений до минеральных форм и обратно осуществляются не только в клетках микроорганизмов, но и активируются внеклеточными ферментами. Скорость их мобилизации зависит в основном от низкой активности деполимеризующих гидролитических ферментов, в процессе действия которых образуются низкомолекулярные органические соединения азота [Хазиев, 1982]. В почве имеются также окислительно-восстановительные и гидролитические ферменты, под действием которых разлагаются органические соединения.

Начальным этапом мобилизации азотистых веществ в почве является гидролитическое расщепление. Пептидные связи и протеиновые компоненты органических веществ почвы гидролизуют протеолитические ферменты. Разложение нуклеиновых кислот катализирует система нуклеаз, при этом образуются азотистые основания: пурины и пиримидины. До гексоаминов азотистые вещества расщепляются под действие гидролаз аминсахара. Аммиак образуется в результате деятельности аммонифицирующих микроорганизмов и действия дезаминирующих ферментов.

Главную роль в трансформации азота в почве играют протеазы, участвующие в превращении белковых веществ. С активностью этих ферментов тесно связана динамика содержания минерального азота в почве. Под действием низких доз азотных удобрений активность протеаз повышается, высоких доз – подавляется [Щербаков, 1976; Хазиев, Агафарова, 1977; Муртазина, 1981].

Истинная аммонификация является следующим этапом за протеолизом и осуществляется с помощью амингидролиза. Так, процессы гидролиза и превращения мочевины тесно связаны с действием уреазы. Ее активность растет с внесением в почву органических и минеральных удобрений. Однако длительное применение одних минеральных удобрений приводит к подавлению ее активности [Хазиев, Агафарова, 1977; Щербаков, 1977; Хазиев, 1982].

Важную роль в азотном обмене в почве играет аспарагиназа, которая катализирует процессы мобилизации азота аспарагина. Аспарагиназа сосредоточена в основном в гумусовом слое почвы. Наибольшей аспарагиназной активностью обладает типичный и карбонатный черноземы [Хазиев, Агафарова, 1977].

Активность глутаминазы значительно выше активности других амидаз (уреазы, аспарагиназы). Под действием глутаминазы дезаминируется глутамин, который содержится в аминокислотной фракции органического вещества почвы. Активность глутаминазы в южных черноземах выше по сравнению с северным [Хазиев, Агафарова, 1977].

Ферментативная активность различных почв неодинакова и связана с их генетическими особенностями и комплексом экологических факторов (табл. 23). В зональном ряду активность протеаз растет от дерново-подзолистых почв к серым лесным и черноземам [Хазиев, 1982]. Пониженная

активность протеаз в кислых дерново-подзолистых и серых лесных почвах обусловлена реакцией среды и меньшей биогенности. Черноземные почвы отличаются более высокой активностью других ферментов, характеризуются более благоприятным режимом азотного питания растений.

Изменение активности протеаз по профилю почвы сопряжено с распределением гумуса, общей биологической активностью и снижается вниз по профилю. Активное действие протеаз проявляется в верхней части гумусового горизонта (A), в нижней его части (AB) их активность резко снижается, а иллювиальные горизонты отличаются незначительной активностью ферментов.

В отличие от дерново-подзолистых и серых лесных почв, в черноземах повышенная протеазная активность распространяется в более глубокие горизонты. Снижение протеазной активности по профилю пахотных почв более плавное, чем у целинных почв. По активности протеаз почвы Предуралья уступают своим аналогам Центральной России и Поволжья [Щербаков, 1978]. Оптимально низкая активность протеаз в почвах Предуралья обусловлена слабой микробиологической активностью, большей континентальностью климата и неблагоприятным гидротермическим режимом [Хазиев, 1982]. Уреазная активность почв Предуралья возрастает от дерново-подзолистых и серых лесных к черноземам. Наиболее высокой активностью уреаз отличается гумусовый горизонт, и уже в переходном горизонте (AB) ее активность резко падает. В черноземах активность уреаз проявляется также в нижней части иллювиального горизонта (B₂).

Таблица 23. Активность ферментов азотного обмена в почвах Предуралья [Хазиев, 1982]

| Горизонт и глубина, см | Гумус, % | Азот общий, мг/кг | Протеаза, мг тирозина | Уреаза | Аспарагиназа | Глутаминаза |
|-------------------------------------|----------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------|-------------|
| | | | | мг NH ₃ | | |
| Дерново-подзолистая почва | | | | | | |
| A _n 0-24 | 1,91 | 1568 | 0,17 | 0,19 | 0,062 | 0,8 |
| A ₁ A ₂ 24-34 | 1,55 | 1120 | 0,15 | 0,11 | 0,052 | не обн. |
| A ₃ 35-40 | 0,45 | 476 | не обн. | 0,07 | не обн. | не обн. |
| Серая лесная тяжелосуглинистая | | | | | | |
| A _n 0-20 | 3,05 | 1766 | 0,23 | 0,39 | 0,04 | 0,04 |
| A _p 29-37 | 2,99 | 1502 | 0,19 | 0,38 | не обн. | не обн. |
| B ₁ 38-48 | 1,53 | 869 | 0,06 | 0,08 | не обн. | не обн. |
| Типичный чернозем | | | | | | |
| A _n 0-20 | 7,61 | 4200 | 0,21 | 0,44 | 0,21 | 3,7 |
| A ₁ 30-40 | 6,95 | 4000 | 0,16 | 0,48 | 0,16 | 3,8 |
| B 85-95 | 1,95 | 1172 | 0,03 | 0,08 | 0,03 | не обн. |
| BC 105-115 | 0,51 | 699 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | не обн. |
| C 115-160 | 0,47 | 586 | не обн. | 0,03 | не обн. | не обн. |

Систематическое (в течение 20 лет) внесение удобрений способствовало повышению общих запасов азота и его подвижных форм в обыкновенном черноземе (табл. 24). Под действием органических удобрений (в течение 65 лет) возрастает протеолитическая и уреазная активность почвы не только по отношению к контролю, но и к эквивалентным дозам минеральных удо-

брений [Рудай, 1998]. Систематическое внесение минеральных удобрений (в течение 65 лет) в средних дозах ($N_{90} P_{120} K_{90}$) активизировало ферментативный комплекс чернозема выщелоченного (Воронежская обл.). Длительное внесение высоких доз удобрений ($N_{135} P_{180} K_{135} N_{190} P_{190} K_{190}$) заметно снизило активность протеазы и уреазы. Порог экологической буферности чернозема выщелоченного лежит, по-видимому, на уровне средних доз удобрений ($N_{90} P_{120} K_{90}$). Систематическое применение навоза способствовало заметному ускорению процессов разложения неспецифических органических соединений и синтезу гумусовых веществ.

Таблица 24. Активность ферментов азотного обмена обыкновенного чернозема при длительном применении удобрений

| Почва | Удобрения | Протеаза, N-NH ₂ мг/г | Уреаза, NH ₂ мг/г | Азот по Корнфилду, мг/г почвы |
|--|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Чернозем обыкновенный, Воронежская обл. | Без удобрений | 0,13 | 0,75 | 196 |
| | $N_{90} P_{52} K_{142}$ | 0,16 | 0,73 | 217 |
| | Навоз 20 т/га | 0,26 | 0,90 | 217 |

Наибольшей активностью в черноземе оподзоленном (Башкирия) протеазы отличались при внесении сульфата аммония и кальциевой селитры (табл. 25). Активность уреазы возрастала только при внесении мочевины в дозе 60 кг/га. Тиомочевина в свою очередь редуцировала активность и протеазы, и уреазы [Хазиев, Агафарова, 1977]. Усиление ферментивной активности при внесении азотных удобрений сказалось на мобилизации азота в почве.

Ферментивные системы активизируются при внесении малых доз азота, а при внесении его высоких доз – только совместно с фосфором, а также при обогащении почвы растворимыми азотсодержащими соединениями. Бобовые предшественники стимулируют протеолитическую активность почвы. В то же время медленная и незначительная (1-3% органического азота) мобилизация азота определяется процессами гидролиза высокомолекулярных органических веществ в почве [Хазиев, 1982].

Таблица 25. Активность протеазы и уреазы чернозема оподзоленного в зависимости от формы азотных удобрений [Хазиев, Агафарова, 1977]

| Форма азотного удобрения | Ферменты | |
|--------------------------|--|------------------------------------|
| | протеаза, N-NH ₂ мг/г почвы | уреаза, NH ₂ мг/г почвы |
| Контроль | 0,38 | 0,40 |
| $Ca(NO_3)_2$ | 0,44 | 0,38 |
| $(NH_4)SO_4$ | 0,49 | 0,40 |
| $(NH_2)CO$ | 0,37 | 0,50 |
| Тиомочевина | 0,29 | 0,12 |

На серых лесных почвах в Иркутской области при выращивании яровой пшеницы значительное снижение активности протеазы под действием азотных удобрений происходило не только при внесении высокой дозы, как на дерново-подзолистой и дерново-луговой карбонатной почвах, но и при применении низкой дозы этого удобрения [Помазкина, 1985]. Активность

уреазы, напротив, повышалась с увеличением дозы азотного удобрения. Однако в зависимости от условий года действие азотных удобрений на активность протеазы проявлялось неоднозначно. Так, при сравнительно высокой активности протеазы (0,34 мг тирозина) азотное удобрение не оказывало влияние на активность фермента. При высоком уровне активности уреазы в серой лесной почве внесение азотных удобрений снижало ее активность. В течение вегетации растений наблюдалась прямолинейная связь между активностью протеазы и гидролизуемыми соединениями азота всех фракций.

Глава 2. Динамика развития азотного пула черноземных почв

В.В. Докучаев [1948] неоднократно подчеркивал важность разработки комплекса мер по сохранению и повышению плодородия русского чернозема: «Чернозем – царь почв, и он нуждается в царском уходе, в противном случае не будет исполнять элементарных обязанностей слуги». Черноземы, занимая 9% площади в пределах СНГ, составляют основу пахотного фонда (60%) и производства товарного зерна (80%) [Щеглов, 1995; Макаров и др. 1995; Смык, 2000].

На западно-предкавказских сверхмощных и мощных малогумусных и среднегумусных черноземах (3% сельскохозяйственных угодий России) производится 16% высококачественного зерна озимой пшеницы, 40% ячменя, 30% подсолнечного масла и 25% сахара [Коробской, 1995].

«Наряду с той или иной системой земледелия есть один вопрос, должествующий прежде всего остановить на себе внимание сельских хозяйев, тем более что этот вопрос большей частью не разрешается простым фактом выбора той или другой системы. Это вопрос о поддержании плодородия земель, о предупреждении истощения почвы – вопрос тем более серьезный, чем развитее система и чем она интенсивнее» [Ермолов, 1995].

Под действием природных и антропогенных факторов происходит эволюция черноземов, т.е. происходят количественные и качественные изменения их состава, биогеохимического круговорота веществ и энергии. Так, наиболее сильные изменения в составе черноземов, органического вещества, содержания элементов питания растений, в формах их соединений происходят под действием удобрений.

За 100-летний период (1881-1981 гг.) содержание гумуса в черноземах лесостепи Поволжья снизилось с 13-17% до 4-7% [Русский чернозем, 1983]. Наиболее сильные изменения черноземные претерпевают после длительной распашки [Черников, Соколов, 2015]. Изменяются также и другие физико-механические свойства чернозема (табл. 26). Основная причина агрохимической деградации черноземов заключается в существенной потере запасов органического вещества – до 40% в пахотном и до 15% в подпахотном слоях. В процессе минерализации гумуса меняется фракционный состав: увеличивается содержание подвижных, нестабильных гумусовых соединений.

Таблица 26. Изменение агрофизических свойств чернозема типичного [Черников, Соколов 2015]

| Угодье | Слой, см | Объемная масса, г/см ³ | Плотность, г/см ³ | Порастость, % |
|-----------------|----------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|
| Некосимая степь | 0-10 | 0,95 | 2,50 | 63 |
| Косимая степь | 0-10 | 1,02 | 2,55 | 60 |
| Лес | 0-10 | 0,93 | 2,60 | 64 |
| Пашня (5 лет) | 0-10 | 1,00 | 2,52 | 61 |
| | 10-20 | 1,02 | 2,56 | 60 |
| Пашня (10 лет) | 0-20 | 1,03 | 2,43 | 58 |
| | 10-20 | 1,18 | 2,58 | 54 |

В выщелоченном черноземе (Краснодарский край, «Бурьянная степь») за более чем 100-летний период (1875-1986 гг.) утеряно 30% содержания гумуса [Коробской, 1995]. Первоначально темпы снижения содержания гумуса были значительно ниже, чем в период интенсивного использования пашни. Это связано с тем, что в первые годы основания черноземов существовавшая система земледелия предусматривала оставление пашни на несколько лет под залежь («толоку»). По мере интенсификации использования почвы растут потери гумуса и азота (табл. 27). Так, за первые 50 лет (1875-1928 гг.) содержание гумуса практически не изменилось. Однако в последующие 50 лет содержание гумуса снизилось на 39%, а количество азота – на 36%. Но в более глубоких слоях почвы потери азота оказались несколько меньшими – на 22%. Одной из причин снижения потерь азота является миграция подвижных фракций органического вещества («стекание гумуса») в более глубокие слои почвы.

В то же время в процессе длительного использования выщелоченного чернозема Предуралья (Башкортостан) в отличие от пахотного слоя в подпахотных горизонтах наблюдалась только тенденция снижения количества азота [Середа, 1999]. В типичном черноземе (Белгородская обл.) за 11 лет его использования количество гумуса в пахотном слое снизилось на 0,09%, тогда как в подпахотном увеличилось на 0,18% [Котлярова, 2015].

Таблица 27. Изменение содержания гумуса и азота в черноземе выщелоченном [Коробской, 1995]

| Слой, см | 1875 г. | 1928 г. | | 1958 г. | | 1978 г. | |
|----------|----------|----------|------|----------|------|----------|------|
| | Гумус, % | Гумус, % | N, % | Гумус, % | N, % | Гумус, % | N, % |
| 0-8 | 5,0-5,3 | 4,98 | 0,25 | 4,05 | 0,16 | 3,04 | 0,16 |
| 40-45 | | 3,92 | 0,18 | 3,79 | 0,16 | 2,74 | 0,14 |

* По материалам исследований: В.В. Докучаев [1936]; П.А. Курчатова [1930]; Б.А. Захаров, Л.П. Леплявченко [1980].

Исходное содержание гумуса в пахотном слое чернозема типичного карбонатного (Репный Луг, Белгородская обл.) в 1986 г. составило 5,2%. За 7 лет его использования количество гумуса снизилось на 0,69%, к 2004 г. уменьшилось еще на 0,09% (табл. 28).

Таблица 28. Динамика содержания гумуса в пахотном и подпахотном слоях чернозема типичного, % [Котлярова, 2015]

| Слой почвы, см | Годы | | | | Баланс, % |
|----------------|------|------|------|------|-----------|
| | 1993 | 2004 | 2009 | 2013 | |
| 0-20 | 4,51 | 4,42 | 4,69 | 4,81 | +0,30 |
| 20-40 | 3,72 | 3,90 | 4,33 | 4,47 | +0,75 |

К 2009 году в результате освоения адаптивно-ландшафтной системы земледелия содержание гумуса в пахотном слое начало расти на 0,27%, к 2013 г. – еще на 0,12% [Котлярова, 2015]. В подпахотном слое содержание гумуса за весь наблюдаемый период продолжало только расти. В результате этого в пахотном слое содержание гумуса увеличилось на 0,30%, а в подпахотном – на 0,75%.

На выщелоченном черноземе в Краснодарском крае выращивали многолетние травы, озимую пшеницу, ячмень, кукурузу, горох, коноплю, однолетние травы [Захаров, Ляплевченко, 1980]. Под них вносили в ограниченных объемах азотные и фосфорные удобрения. За 50 лет содержание гумуса в слое почвы 0-8 см снизилось на 39%, в слое 40-45 см – на 30%, а азота – на 36 и 22% соответственно, т.е. в подпахотном слое содержание азота снижалось в 1,6 раза меньше, чем в верхнем слое почвы (табл. 29).

Таблица 29. Содержание гумуса и общего азота в различных слоях выщелоченного чернозема [Захаров, Ляплевченко, 1980]

| Год | Слой почвы, см | Гумус, % | Азот общий, % |
|------|----------------|----------|---------------|
| 1928 | 0-8 | 4,98 | 0,248 |
| | 40-45 | 3,92 | 0,181 |
| 1958 | 0-8 | 4,05 | 0,163 |
| | 40-45 | 3,79 | 0,155 |
| 1978 | 0-8 | 3,04 | 0,159 |
| | 40-45 | 2,74 | 0,141 |

Следовательно, органическое вещество черноземных почв является динамичной системой. Лабильные формы гумусовых веществ перераспределяются по профилю почвы в зависимости от количества и состава поступающего органического вещества, интенсивности минерализации, морфогенеза подстилающей породы и режима увлажнения (количества осадков).

Для типичного чернозема (в отличие от обыкновенного) характерна высокая миграция лабильных органических веществ и накопление гумуса в средней части почвенного профиля [Парфенова, 1997]. К тому же обыкновенные черноземы отличаются большими потерями органического вещества в пределах всего профиля по сравнению с типичными. В итоге, при оценке потерь гумуса и азота в процессе длительного использования черноземных почв необходимо учитывать их запасы не только в пахотном, но и в подпахотном слое, азот которого используется возделываемыми культурами.

В конце XIX ст. содержание гумуса в Пензенских черноземах составляло 10,3-15,0%, а общего азота – 0,612-0,701% [Власова, 1999]. За 100 лет запасы гумуса (чернозем выщелоченный; пашня) в 25-сантиметровом слое снизилось с 280 до 255 т/га (ежегодное снижение на 0,55 т/га). За этот же

период падение запасов общего азота в почве достигло 2,7 т/га (27 кг/га за год) [Сатаров, 1999].

Содержание гумуса и азота в почве (чернозем выщелоченный, Пензенская обл.) изменяется в зависимости от длительности ее использования (табл. 30). Минерализация гумуса в результате распашки целины Попереченской степи в первые 10 лет составила 0,333% в год, за последующие 15 лет – 0,032% (снижение в 10 раз), за последующие 20 лет – 0,013%, а за последние 55 лет составило 0,01% в год [Власова, 1999]. В подпахотном слое почвы (25-40 см) снижение содержания гумуса после распашки за 10 лет составило 1,93%, за 25 лет – 2,12%, за 45 лет – 2,55%, за 100 лет – 2,98%.

Таблица 30. Содержание гумуса и общего азота в распаханых черноземах, % [Власова, 1999]

| Слой почвы, см | Культурный возраст | | | | | | | |
|----------------|--------------------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|
| | 10 лет | | 25 лет | | 45 лет | | 100 лет | |
| | гумус | азот | гумус | азот | гумус | азот | гумус | азот |
| 0-25 | 9,87 | 0,510 | 9,39 | 0,500 | 8,81 | 0,469 | 8,23 | 0,434 |
| 25-40 | 8,67 | 0,387 | 8,48 | 0,329 | 8,05 | 0,373 | 7,62 | 0,390 |
| 50-60 | 6,76 | 0,312 | 6,64 | 0,311 | 6,62 | 0,314 | 6,40 | 0,303 |
| 70-80 | 4,00 | 0,271 | 3,94 | 0,232 | 3,79 | 0,240 | 3,60 | 0,221 |
| 80-90 | 2,90 | 0,175 | 2,71 | 0,170 | 2,65 | 0,182 | 2,60 | 0,159 |
| 110-120 | 1,24 | 0,079 | 1,01 | 0,069 | 1,13 | 0,085 | 1,21 | 0,076 |
| 140-150 | 1,10 | 0,076 | 0,92 | 0,064 | 0,96 | 0,072 | 1,00 | 0,070 |

По мере усиления использования чернозема содержание общего азота в почве падало параллельно изменению количества гумуса. Наиболее интенсивно падение количества азота происходило в 40-сантиметровом слое почвы в начальные 10 лет, затем скорость минерализации органического вещества замедляется. В более глубоких слоях почвенного профиля содержание общего азота изменяется незначительно.

Процесс деградации черноземов ЦЧР идет быстрыми темпами [Адерихин, 1964; Щербаков, Рудай, 1983; Милащенко, 1998]. Так, за 300 лет использования черноземов содержание гумуса снизилось на 27%, азота – на 28% по сравнению с залежью (табл. 31). При падении содержания гумуса на 1% потери азота составляют примерно 0,05%. При длительном использовании черноземов без применения органических и минеральных удобрений падение содержания азота в почве составляет 0,001-0,002% в год.

Таблица 31. Изменение плодородия чернозема обыкновенного в зависимости от длительности его использования [Адерихин, 1964]

| Угодье, возраст | Гумус, % | | Азот общий, % | |
|-----------------|------------|---|---------------|---|
| | содержание | изменение содержания по сравнению с залежью | содержание | изменение содержания по сравнению с залежью |
| Залежь, 70 лет | 11,4 | 100 | 0,57 | 100 |
| Пашня: | | | | |
| 25 лет | 10,5 | 92 | 0,52 | 91 |
| 75 лет | 9,5 | 83 | 0,47 | 82 |
| 300 лет | 8,3 | 73 | 0,41 | 72 |

В условиях 4-польного севооборота (кукуруза на зелёную массу – яровая пшеница – яровая пшеница – овес) на выщелоченном черноземе (Курганская обл.) длительное (35 лет) применение минеральных удобрений (N_{46+69} на фоне Р и РК) обеспечило положительный баланс гумуса и азота в почве (табл. 32). При внесении азотных удобрений в дозе 23 кг/га содержание гумуса и азота снижалось [Телегин, 2007]. Повышению содержания гумуса и азота способствовали ПКО и солома зерновых культур, которые ежегодно запахивались в почву. В почве залежи содержание гумуса за этот период изменялось мало, а количество азота не изменялось вовсе. Повышение содержания гумуса в пахотном слое улучшало соотношение С:N с 9,9 до 10,5. Внесение удобрений повышало биологическую активность почвы, в том числе нитрификационную активность.

Таблица 32. Влияние длительного применения минеральных удобрений на содержание гумуса и азота в пахотном слое почвы (Телегин, 2007)

| Вариант | Гумус, % | Азот общий, % | С:N | Нитрификационная способность, $N-NO_3^-$ мг/кг |
|----------------------|----------|---------------|------|--|
| Исходные показатели | 4,63 | 0,34 | 13,6 | |
| Контроль | 5,04 | 0,34 | 9,9 | 9,36 |
| $N_{23}P_{23}$ | 4,92 | 0,32 | 10,5 | 9,36 |
| $N_{46}P_{23}K_{23}$ | 6,19 | 0,40 | 10,5 | 2,34 |
| Залежь | 4,82 | 0,34 | 9,5 | 1,37 |

На долю черноземов в Западной Сибири приходится 25% (31 млн. га) почвенных ресурсов региона. Черноземные почвы в Западной Сибири представлены в степной и южной лесостепной зонах. Большая часть черноземов освоена в начале XX ст. (в период столыпинских реформ). Длительное использование черноземов Сибири привело их, по выражению В.В. Докучаева [1936], к категории «малосильных, скоровыпахивающихся». Длительное экстенсивное земледелие значительно снизило содержание гумуса в черноземах почвах (табл. 33).

Таблица 33. Снижение запасов гумуса в черноземах Новосибирской области [Чагин и др., 1986]

| Зона | Почва | Годы | Запас гумуса, т/га | Потери гумуса | |
|--------------------|-----------------------|------|--------------------|---------------|----|
| | | | | т/га | % |
| Северная лесостепь | Чернозем выщелоченный | 1938 | 244 | | |
| | | 1976 | 185 | 59 | 24 |
| Южная лесостепь | Чернозем солонцеватый | 1938 | 225 | | |
| | | 1980 | 163 | 62 | 28 |
| Степь | Чернозем южный | 1938 | 197 | | |
| | | 1980 | 97 | 100 | 51 |

В течение 30-40 лет содержание гумуса в 30-сантиметровом слое черноземных почв снизилось на 24-51%. Наибольшее количество гумуса те-

ряли южные черноземы (51% от исходного количества) [Чагин и др., 1986]. Потери гумуса происходят в основном за счет активной его части [Милащенко, 1998]. Оставшаяся часть гумуса прочно закрепляется в почве соединениями, достаточно устойчивыми к биологическому воздействию. Потери активной части гумуса ведут к разрушению структуры почвы, снижают ее противозерозивную устойчивость.

Падение содержания и запаса азота в черноземных почвах происходит вследствие: снижения объемов применения органических и минеральных удобрений; уменьшения количества растительных остатков из-за снижения объемов применения удобрений; нарушения баланса азота между отчуждением его с урожаем возделываемых культур и поступлением в почву; усиления минерализации органического вещества в результате интенсивной обработки; усиления минерализации органического вещества почвы при длительном одностороннем применении минеральных удобрений; физико-химической и биологической деградации гумуса под действием физиологически кислых удобрений; стимулирования минерализации органического вещества в органогенных почвах в первые годы их освоения; снижения поступления биомассы сорной растительности в почву в результате усиления агротехнических и химических приемов борьбы с сорняками; снижения биоразнообразия почвенного биома в результате химизации технологий выращивания сельскохозяйственных культур; развития эрозийных процессов; интенсификации миграционных процессов в результате длительного орошения.

Потери гумуса и азота ведут к снижению плодородия черноземных почв, что негативно сказывается на производстве растениеводческой и животноводческой продукции, снижении ее качества, ухудшении состояния окружающей природной среды. В связи с этим разработка систем воспроизводства плодородия черноземных почв, повышения эффективности органических и минеральных удобрений, увеличения продуктивности и улучшение качества продукции при минимальных нагрузках на агроэкосистемы является актуальной задачей.

Наибольшим сезонным изменениям в черноземных почвах подвержены минеральные формы азота. Содержание минерального азота в почве является динамичной величиной, поскольку зависит от действия множества разнонаправленных факторов. В зависимости от биоклиматических условий интенсивность и направленность трансформации азота в почве складываются по-разному. По динамике изменения запасов минерального азота в почве определяют обеспеченность возделываемых культур азотом и уровень их продуктивности, а также изменение качества урожая (продукции). По уровню запасов минерального азота в почве судят об опасности загрязнения продукции нитратами, о газообразных потерях азота, а также о поступлении азотистых соединений в природные поверхностные и грунтовые воды [Завалин, Соколов, 2016].

Ближайший резерв доступного растениям азота сосредоточен в активном пуле органического вещества почвы со временем существования менее 3-х лет, одним из главных которого является азот микробной биомассы [Семенов, 2008]. На одну единицу азота микробной биомассы приходится более

3-х единиц потенциально минерализуемого азота. На долю минерального азота в активном пуле приходится 12-36% минерального азота, микробной биомассы 29-44% и неидентифицируемой фракции до 54%.

Содержание минерального азота в почве зависит одновременно и от размера его образования, и от степени расходования. Поэтому необходимо определять общие и чистые размеры минерализации, иммобилизации и нитрификации за единицу времени. Скорости общей минерализации и общей нитрификации определяют по изменению соотношения $^{15}\text{NH}_4^+ / ^{14}\text{NH}_4^+$ и $^{15}\text{NO}_3^- / ^{14}\text{NO}_3^-$, а общую иммобилизацию аммонийного или нитратного азота – по соотношению $^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$ в микробной биомассе. Повышенное содержание минерального азота в почве может быть результатом как высокой минерализации и нитрификации, так и незначительного расхода при невысокой общей минерализации и нитрификации.

Количественным критерием круговорота азота в экосистеме служит азот-минерализующая способность черноземов [Головина, 2000]. Длительное использование чернозема выщелоченного (Тульская обл.) ведет к снижению АМС почвы по сравнению с луговым сообществом (табл. 34). Интенсивное использование черноземов приводит к истощению (снижение содержания общих азота и углерода) почвы в агрофитоценозах по сравнению с естественными аналогами.

Таблица 34. Азотминерализующая способность и содержание различных форм азота в черноземе выщелоченном [Головина, 2000]

| Растительность | мг N/кг | | | | | С, % | С: N |
|------------------|---------|-----------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|------|------|
| | АМС | NO_3^- | $\text{N} / ^{14}\text{NH}_4$ | $\text{N}_{\text{мин}}$ | $\text{N}_{\text{общ}}$ | | |
| Естественный луг | 208,3 | 7,7 | 27,6 | 35,3 | 2470 | 4,49 | 18,2 |
| Ячмень | 83,4 | 20,4 | 17,7 | 38,1 | 1986 | 3,51 | 17,7 |

Процессы нитрификации и накопления NO_3^- в почве зависят от свойств почвы, метеорологических и агротехнических условий. Содержание N-NO_3^- (кг/га) в слабовыщелоченном черноземе во время сева яровой пшеницы зависело от погодных условий предшествующего года [Кочергин, Гамзиков, 1972]:

| | | |
|---------------------------------------|-------|-----|
| Состояние погоды предшествующего года | Зябрь | Пар |
| Нормальный | 56 | 158 |
| Засушливый | 114 | 168 |
| Дождливый | 31 | 75 |

Полное минеральное удобрение, навоз и их сочетание повышает нитрификационную способность пахотного и подпахотного слоев типичного чернозема (Воронежская обл.). Максимальной нитрификационной способностью обладал корнеобитаемый слой при совместном внесении навоза (8 т/га) и минеральных удобрений [Щербаков, Рудай, 1983]. Полное минеральное удобрение повышало нитрификацию до 60 см глубины выщелоченного чернозема (табл. 35).

Таблица 35. Нитрификационная способность выщелоченного чернозема, мг/100г почвы [Щербаков, Рудай, 1983]

| Вариант | Глубина, см | Предшественник | |
|--|-------------|----------------|----------------|
| | | горох | озимая пшеница |
| Контроль (без удобрений) | 0-40 | 4,0 | 3,4 |
| | 40-60 | 4,4 | 2,9 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅ | 0-40 | 5,7 | 3,9 |
| | 40-60 | 4,7 | 2,8 |
| N ₉₀ P ₁₂₀ K ₉₀ | 0-40 | 4,6 | 4,3 |
| | 40-60 | 3,3 | 3,3 |

Оптимальные условия для нитрификации создавались при внесении минеральных удобрений в двойной дозе. Нитрификация более интенсивно протекает в посеве гороха по сравнению с озимой пшеницей.

Запасы общего азота в 1-метровом слое типичного чернозема (Тамбовская обл.) составляют 33 т/га, из них 11 т/га приходится на пахотный слой [Макаров, 1990]. Запас минерального азота в этом слое почвы может достигать до 300 кг/га. Если количество минерального азота в пахотном слое принять за 100%, то в слое 30-50 см его запас составил 50%, в слое 50-70 см – 40%, в слое 70-100 см – 60% от запаса в пахотном слое почвы.

В типичном черноземе (Белгородская обл.) содержание минерального азота изменяется в зависимости от вида культуры и места ее в севообороте [Никитин, 1997]. Количество NO₃⁻ в почве в вариантах без удобрений и с внесением одного навоза преимущественно накапливается в слое 0-80 см. При внесении азотных удобрений нитраты опускаются значительно глубже. Количество NO₃⁻ в пахотном слое рано весной составляет 65-70% от их запасов в 1-метровом слое. В период уборки урожая в почве (слой 0-100 см) остается 11-19 кг/га нитратов.

В черноземах Красноярского края запасы азота в пахотном слое составляют 2-15 т/га и 3-50 т/га – в почвенной толще [Крупкин, 1982]. Запас минерального азота в черноземах Канской лесостепи колеблется в широких пределах (80-322 кг/га). Количество легкогидролизуемого азота тесно коррелирует с обеспеченностью почв гумусом.

Содержание минерального азота в черноземах Башкортостана варьируется в широких пределах (табл. 36). Содержание минерального азота в пахотном слое колеблется в пределах 0,17-2,0% от общего азота почвы. Для распределения аммонийного азота характерно уменьшение абсолютного содержания и повышение относительного его количества с глубиной. Наибольшее количество нитратов в почвах Башкортостана накапливается весной; отмечается накопление NO₃⁻ на глубине ниже 90 см, начиная с июня количество нитратов резко снижается в связи с потреблением их растениями.

Таблица 36. Распределение различных форм минерального азота в черноземах Башкортостана, мг/кг [Хазиев, Наумов, 1979]

| Чернозем | Глубина, см | Минеральный азот | В том числе | |
|--------------|-------------|------------------|-------------|-----------|
| | | | аммонийный | нитратный |
| Выщелоченный | 0-25 | 38,9 | 35,0 | 3,9 |
| | 30-40 | 25,3 | 20,5 | 4,8 |
| | 45-55 | 32,8 | 28,0 | 4,8 |
| Типичный | 0-28 | 43,7 | 34,8 | 8,9 |
| | 35-45 | 28,4 | 25,0 | 3,4 |
| | 59-69 | 16,4 | 14,4 | 2,0 |
| | 82-92 | 16,0 | 13,7 | 2,3 |
| | 117-127 | 14,0 | 9,5 | 4,5 |

При выращивании озимой пшеницы на выщелоченном черноземе (Белгородская обл.) запас минерального азота по профилю почвы весной практически не изменился по сравнению с осенним периодом, кроме варианта с внесением навоза и минеральных удобрений (табл. 37).

Таблица 37. Содержание минерального азота в черноземе выщелоченном при выращивании озимой пшеницы [Доманов, 1995]

| Вариант | Слой почвы, см | N _{мин} , кг/га | | Весеннее содержание N _{мин} к осеннему, % |
|--------------------------|----------------|--------------------------|-------|--|
| | | осень | весна | |
| P60K60 | 0-30 | 60 | 61 | 102 |
| | 0-60 | 94 | 102 | 109 |
| | 0-90 | 132 | 129 | 98 |
| N60P60K60 | 0-30 | 86 | 84 | 98 |
| | 0-60 | 141 | 146 | 101 |
| | 0-90 | 186 | 186 | 98 |
| Навоз 40 т/га+ N60P60K60 | 0-30 | 115 | 81 | 70 |
| | 0-60 | 196 | 145 | 74 |
| | 0-90 | 250 | 211 | 84 |

При внесении 40 т/га навоза и N₆₀P₆₀K₆₀ запас минерального азота в почве к весне снизился в слое 0-60 см на 26%. В составе минерального азота соотношение NO₃⁻ и NH₄⁺ зависело от погодных условий. В засушливые годы нитраты преобладали над аммонийной формой, в менее засушливые повышалось относительное содержание аммонийного азота. Количество NO₃⁻ в 60-сантиметровом слое почвы служит достоверной характеристикой обеспеченности растений азотом на протяжении всего периода вегетации. Однако в период трубокования растений индекс обеспеченности азотом на фоне N₆₀P₆₀K₆₀ достигал величины 2,1-2,4 и приближался к оптимальному [Доманов, 1995]. Проведение дополнительной подкормки азотом в период трубокования повысило индекс обеспеченности до 2,7-2,8, что обеспечило формирование зерна высокого качества (содержание клейковины 34,6%).

При выращивании озимой пшеницы на черноземе выщелоченном (Краснодарский край) наибольшее количество минерального азота в слое 0-60 см накапливалось осенью (контроль), уменьшалось к весне до полного исчезновения в фазу колошения и несколько повышалось к периоду полной

спелости зерна [Морозова, 1992]. Максимальное количество NO_3^- (свыше 70 мг/кг) находилось в почве под озимой пшеницей в декабре при внесении навоза (90 т/га) и азотных удобрений (150 кг/га). Азотные удобрения повышали содержание нитратов в почве в 2-4 раза, навоз полуперепревший – в 1,5-2 раза по сравнению с контролем. Для черноземов Кубани характерно вымывание значительной части нитратов в глубокие слои почвы за зимний период: количество NO_3^- в слое 40-60 см увеличивается в 2 раза. Содержание минерального азота в пахотном слое в фазу колошения озимой пшеницы снижалось до 1,7-4 мг/кг, в подпахотном – до 1,5-4,6 мг/кг, в слое 40-60 см – до 1,2-3,5 мг/кг.

Проблема сохранения азота в почве в условиях Кавказского региона имеет важное народнохозяйственное значение, поскольку длительное время (осень-зима-весна) почва на полях не занята растительностью. Кроме того, этот период характеризуется положительными температурами и выпадением жидких атмосферных осадков.

На количество азота в почве существенное влияние оказывают предшественники. Наибольшее количество NO_3^- в почве под озимой пшеницей накапливается в апреле-мае (30-60 мг $\text{NO}_3^-/\text{кг}$), затем по мере вегетации растений снижается, достигая минимума в конце мая начало июня (рис. 1).

В конце июня количество NO_3^- в слое 0-100 см выщелоченного чернозема (Краснодарский край) возросло, что, по-видимому, вызвано восходящим током почвенной влаги. Наибольшие изменения содержания нитратов в почве происходят по обороту пласта – высокий уровень нитрификации, наименьшие – по люцерне. Такая динамика содержания NO_3^- в почве сохранялась как в годы достаточного, так и недостаточного увлажнения.

При восходящем движении воды по профилю почвы возможно перемещение нитратов из глубоких почвенных горизонтов в верхние слои [Гетманец, Авраменко, 1976; Лукин, 1992]. При интенсивном испарении влаги на поверхности почвы с высоким содержанием N- NO_3^- возможно появление «нитратных пятен» [Viets, Nageman, 1971].

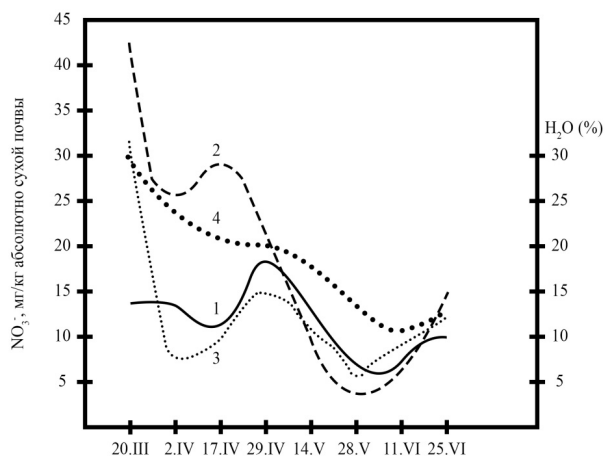


Рисунок 1. Динамика влажности и нитратов в слое 0-100 см выщелоченного чернозема под озимой пшеницей по различным предшественникам [Симакин, 1969]

- Нитраты:
1. ————— по люцерне;
 2. - - - - - по обороту пласта;
 3. по занятому пару;
 4. ●●●●●●●● влажность почвы.

Количество нитратов распределялось по почвенному профилю аналогично содержанию воды [Симакин, 1969]. В ходе вегетации озимой пшеницы различные слои почвы накапливали неодинаковое количество NO_3^- (рис. 2). Наибольшее количество нитратов находилось в слое 0-5 см и 60-80 см. В почве по занятому пару выделяется еще один слой (10-20 см) с высоким содержанием NO_3^- , что, по-видимому, связано с минерализацией органического вещества, составом и состоянием почвенной влаги, поскольку нитраты в почве не сорбируются.

Несоответствие пиков распределения NO_3^- динамике содержания воды в почве связано с двумя факторами: во-первых, в зависимости от предшественника меняется ионный состав почвенного раствора, во-вторых, несмотря на снижение общего количества воды, миграция отдельных ее форм (капиллярная, рыхлосвязанная, сводная и т.д.) идет в разных направлениях с неодинаковой скоростью, увлекая за собой ионы NO_3^- .

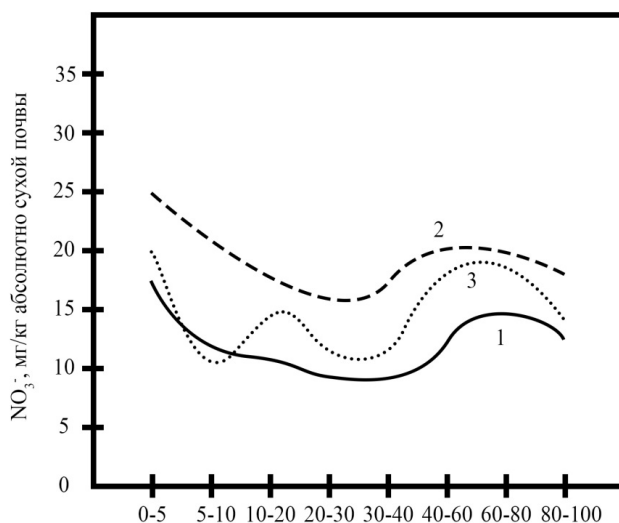


Рисунок 2. Содержание нитратов под озимой пшеницей по горизонтам выщелоченного чернозема в зависимости от предшественников [Симакин, 1969]

- Нитраты:
1. ————— по люцерне;
 2. - - - - - по обороту пласта;
 3. по занятому пару.

На рост, развитие и продуктивность озимой пшеницы в условиях черноземов почв существенное влияние оказывают полеззащитные лесные полосы. Под действием лесных полос меняется микроклимат территории,

улучшаются водообеспеченность и плодородие почв, ослабевают эрозионные процессы. Однако в отдельные годы проявляются негативные явления: усиливается миграция питательных веществ, проявляются полегание и выпревание посевов, повреждения растений болезнями и вредителями.

Действие лесных полос сказывается, прежде всего, на азотном режиме почв (табл. 38).

Таблица 38. Динамика содержания нитратного азота в почве при выращивании озимой пшеницы, мг/кг [Кретинин, 1979]

| Расстояние от лесополосы, Н * | Глубина, см | Даты | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------|------|------|-------|---------|
| | | 27.IV | 18.V | 2.VI | 20.VI | 23.VIII |
| 5 | 0-10 | 6,6 | 5,3 | 3,7 | 4,0 | 4,2 |
| | 10-30 | 11,3 | 11,0 | 3,7 | 2,8 | 3,0 |
| | 30-50 | 13,7 | 14,1 | 8,7 | 7,6 | 3,4 |
| 10 | 0-10 | 15,8 | 5,5 | 2,9 | 3,4 | 5,1 |
| | 10-30 | 12,4 | 10,5 | 4,4 | 6,4 | 3,9 |
| | 30-50 | 14,1 | 19,1 | 8,6 | 5,7 | 6,9 |
| 30 | 0-10 | 12,2 | 21,6 | 15,4 | 3,0 | 4,4 |
| | 10-30 | 27,2 | 26,2 | 9,3 | 14,8 | 8,0 |
| | 30-50 | 18,8 | 22,0 | 19,1 | 10,8 | 10,7 |

* Н – высота древостоя.

Содержание NO_3^- в почве (чернозем обыкновенный, Волгоградская обл.) зависит от расстояния от лесных полос на протяжении всего периода вегетации озимой пшеницы. В зоне снежных шлейфов содержание нитратов в почве (слой 0-50 см) значительно ниже, чем в середине поля. Дальность влияния лесных полос на количество N-NO_3^- в почве отмечается на расстоянии до 12,5 Н с заветренной стороны и до 4 Н с наветренной стороны. Накопление отложений снега вблизи лесных полос и более глубокое промачивание почвы в весенний период способствует вымыванию нитратов [Кретинин, 1976]. Потери N-NO_3^- из слоя почвы 0-50 см за холодный период года достигали на заветренной стороне (0-10 Н) 80 кг/га, на наветренной стороне (0-8 Н) от полосы – 22 кг/га, на середине поля – 20 кг/га [Кретинин, 1976]. В грунтовых водах вблизи лесных полос количество нитратов доходило до 4-7 мг/л, а в середине поля – 0,1-0,3 мг/л.

Содержание N-NH_4^+ в почве оставалось низким и колебалось в пределах 5,7-7,5 мг/кг в пахотном и 5,5-7,4 мг/кг в подпахотном слоях. Содержание аммонийного азота повышалось вблизи лесных полос в основном в подпахотном слое [Кретинин, 1979].

Низкое содержание N-NO_3^- в почве вблизи лесополос вызвано большим потреблением азота озимой пшеницей (табл. 39). При этом большая часть азота накапливалась в надземных органах (преимущественно в зерне). В ПКО содержалось 9-10 кг/га азота, тогда как в зерне 73-97 кг/га.

Таблица 39. Потребление азота озимой пшеницей зависимости от расстояния от лесополос [Кретинин, 1979]

| Расстояние от лесополос, Н * | Накопление азота, кг/га | | | | Вынос азота | |
|------------------------------|-------------------------|--------|-------------------|-------|-------------|------|
| | зерно | солома | пожнивные остатки | корни | кг/га | кг/т |
| 5 | 97,4 | 18,6 | 4,6 | 4,0 | 124,6 | 28 |
| 10 | 74,5 | 14,6 | 3,8 | 5,5 | 98,4 | 30 |
| 30 | 73,2 | 12,1 | 3,8 | 5,3 | 94,4 | 33 |

* Н – высота древостоя.

Содержание минерального азота в черноземе типичном (Воронежская обл.) зависит от погодных условий периода вегетации ячменя и вносимых удобрений [Крутских, 1995]. Максимальное количество минерального азота в почве содержалось в период кущения ячменя, минимальное – к моменту формирования зерна. Внесение удобрений осенью повышало количество минерального азота в почве на 11-52%. Преобладающей формой азота в типичном черноземе является нитратная на протяжении всего периода вегетации растений. Наибольшее количество минерального азота потреблял короткостебельный сорт ячменя Дворан, минимальное – Одесский 100.

При возделывании сахарной свеклы содержание азота в черноземе обыкновенном снижалось от весны к августу [Медведев, 1996; Супрун, 2008; Ильюшенко, 2015]. Азотные удобрения повышали количество N- NO₃⁻ на 1,9% (табл. 40). При внесении навоза поступающие микроорганизмы частично используют минеральный азот, снижая его количество в почве. Использование навоза (40т/га), минеральных удобрений и дефеката (5т/га) создавали условия максимальной мобилизации азота в почве, в результате содержание N- NO₃⁻ повышалось на 20-23% [Супрун, 2008].

Таблица 40. Динамика содержания азота нитратов в слое 0-30 см обыкновенного чернозема при выращивании сахарной свеклы [Супрун, 2008]

| Вариант | Содержание N- NO ₃ ⁻ , мг/кг | | | |
|---|--|-------------------|------------------------|---------------|
| | всходы | смыкание в рядках | смыкание в междурядьях | уборка урожая |
| Контроль, б/удобрений | 10,2 | 14,8 | 11,4 | 5,4 |
| N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ | 9,9 | 17,1 | 8,8 | 6,7 |
| Навоз 40+ + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ | 10,6 | 14,4 | 10,6 | 6,5 |
| Навоз 40+N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + дефекат 5 | 15,0 | 18,3 | 10,9 | 6,9 |

При выращивании сахарной свеклы на выщелоченном черноземе (Липецкая обл.) содержание аммонийного и нитратного азота существенно возрастает под действием КАС (табл. 41). Количество аммонийного азота возрастает больше при внесении жидкой формы азотного удобрения по сравнению с твердыми туками. Наиболее заметно возрастает содержание минерального азота в почве при совместном внесении навоза и КАС. Высокое содержание минерального азота в почве сохраняется на протяжении всего периода вегетации сахарной свеклы.

Таблица 41. Динамика содержания аммонийного и нитратного азота в выщелоченном черноземе при выращивании сахарной свеклы [Воронин, 1997]

| Вариант | Аммонийный азот, мг/кг | | | Нитратный азот, мг/кг | | |
|--|------------------------|----------|--------|-----------------------|----------|--------|
| | всходы | смыкание | уборка | всходы | смыкание | уборка |
| Фон (P ₁₄₀ K ₁₀₀) | 21,0 | 31,6 | 24,1 | 16,8 | 16,4 | 9,7 |
| Фон + N ₁₂₀ КАС | 26,0 | 36,0 | 28,1 | 20,5 | 21,0 | 11,7 |
| Фон + навоз, 30т/га | 72,4 | 47,5 | 38,0 | 34,1 | 27,5 | 14,8 |

Черноземные почвы с экологической точки зрения выполняют биогеохимическую роль в отношении азота (нитратов). Поскольку из азотсодержащих соединений в основном мигрируют нитраты, постольку важным является управление процессами нитрификации. Распределение азота по профилю зависит от гранулометрического состава почвы, вида возделываемой культуры, количества осадков и применяемых доз азотных минеральных и органических удобрений.

Внесение натриевой селитры (меченой ¹⁵N) в дозе 120 кг/га в пахотный слой чернозема типичного (Белгородская обл.) к сентябрю обеспечило его миграцию по всему почвенному профилю (табл. 42). Через два месяца после внесения в почве закрепилось 77,9% азота удобрения [Лукин, 1992, 2011]. Основное количество азота удобрения накапливалось в верхнем слое почвы 0-50 см. Весной следующего года в почве иммобилизовалось 69% азота удобрения, а потери возрастали до 31% от применяемой дозы. При этом значительное количество азота (46%) мигрировало в слой 75-125 см. В процессе роста сахарная свекла использовала 31%, в почве закрепилось 22%, а потерялось 47% азота удобрения. Высокие потери азота обусловлены тем, что основное его количество (31%) терялось до посева сахарной свеклы.

Таблица 42. Баланс азота натриевой селитры при осеннем внесении в пахотный слой типичного чернозема под сахарную свеклу, % от внесенной дозы [Лукин, 1992]

| Показатель | Период отбора проб | | |
|--|--|------------------------|----------------------------|
| | ноябрь (через 2 месяца после внесения удобрения) | май (перед посевом) | сентябрь (после уборки) |
| Использовано свеклой | 0 | 0 | 30,7 |
| Потери | 22,1 | 30,9 | 47,0 |
| Обнаружено в почве (слой 0-150 см) | 77,9 | 69,1 | 22,3 |
| в том числе по слоям поч- венного профиля | 0-25 | 33,0 | 6,3 |
| | 26-50 | 34,6 | 5,6 |
| | 51-75 | 6,2 | 9,3 |
| | 76-100 | 2,5 | 33,6 |
| | 101-125 | 1,6 | 12,1 |
| | 126-150 | следы | 2,2 |

Динамическое равновесие между процессами азотного обмена в черноземах приводит к существенному колебанию содержания и запасов минерального азота в почве [Щербаков, Рудай, 1983; Богданов, 1993; Доманов, 1995; Воронин, 1997; Середа, 1999; Иванова, 2013; Ильюшенко, 2015]. В го-

дичном цикле содержание минеральных форм азота меняется в зависимости от вида возделываемой культуры в севообороте [Богданов, 1993; Серeda, 1999]. В севообороте на выщелоченном черноземе наибольшее количество нитратного и аммонийного азота накапливалось в паровом поле, затем их содержание снижалось к замыкающей культуре (рис.3).

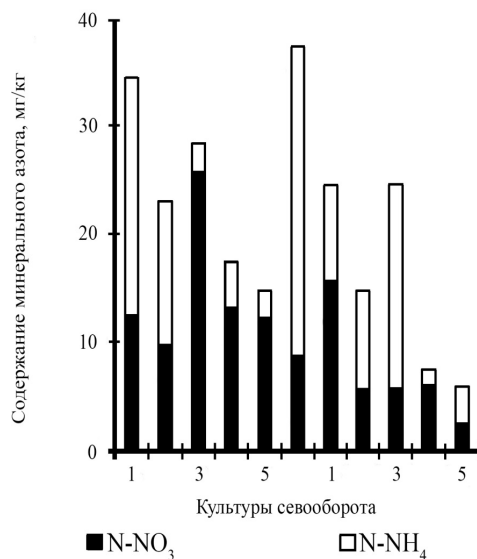


Рисунок 3. Динамика минеральных форм азота в годовом цикле, чернозем выщелоченный [Серeda, 1999]

1 – озимая рожь, 2 – яровая пшеница, 3 – кукуруза, 4 – яровая пшеница, 5 – овес, 6 – ч. пар

При этом повышенное количество минерального азота накапливалось в почве при возделывании кукурузы, что может быть обусловлено частыми обработками, повышением аэрации и биологической активности почвы.

В черноземах Башкортостана максимальное количество минерального азота накапливалось весной (в апреле – в начале мая при повышении температуры), минимальное его содержание отмечено в июле [Серeda, 1999]. К концу августа содержание минерального азота в почве повышалось. Сезонные изменения содержания минерального азота под посевами сельскохозяйственных культур и в паровом поле были тождественны, что нельзя объяснить только потреблением азота возделываемыми культурами. По-видимому, динамика содержания минерального азота связана с действием целого комплекса факторов (активность биоты и ферментных систем, хода физико-химических процессов окислительно-восстановительного характера).

Максимальное количество нитратного азота в метровом слое чернозема типичного (Башкортостан) накапливалось весной в паровом поле (814 кг/га) и при совместном внесении навоза и минеральных удобрений (292 кг/га), минимальное – при использовании сидерата (горох, 25 т/га) на фоне $N_{90}P_{60}K_{30}$ (201 кг/га) [Богданов, 1993]. При внесении минеральных удобрений (а также удобрений и заделка сидерата) основное количество $N-NO_3^-$ накапливалось в

слое 0-60 см. Навоз (60 т/га) на фоне минеральных удобрений оказывал специфическое влияние на миграцию нитратов и распределение их по профилю чернозема: основное их количество накапливалось в 80 сантиметровом слое с максимумом в слое 20-60 см (рис. 4). В более глубоких слоях почвенного профиля содержание $N-NO_3^-$ существенно снижалось.

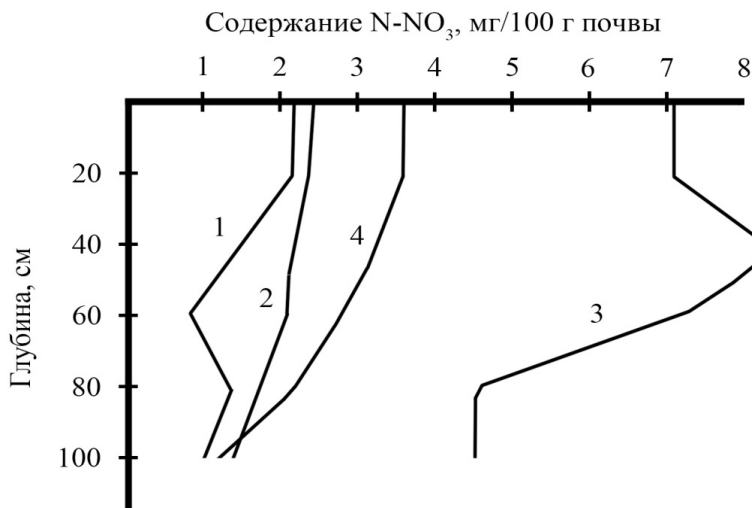


Рисунок 4. Миграция нитратного азота по профилю чернозема типичного [Богданов, 1993]
 1 – без удобрений; $N_{90}P_{60}K_{30}$ – навоз 60 т/га + $N_{90}P_{60}K_{30}$; 4 – сидерат 25 т/га + $N_{90}P_{60}K_{30}$

Кроме того, характер изменения пула минерального азота тесно связан с климатическими условиями зоны и генетическими особенностями почв. В начале периода вегетации в черноземе выщелоченном характер этой связи прямой, в дальнейшем, в ходе вегетации растений, количество минерального азота обратно пропорционально среднесуточной температуре воздуха [Середа, 1999].

В черноземе типичном мобилизация азота в основном определялась условиями увлажнения. Весной количество минерального азота прямо пропорционально количеству выпавших осадков; в дальнейшем (в ходе вегетации растений) эта зависимость меняется на обратную, поскольку осадки в августе способствуют усилению процессов аммонификации.

В черноземе обыкновенном положительное влияние на накопление минерального азота в почве оказывает температура в период сева полевых культур. Однако в конце всего периода вегетации количество минерального азота было обратно пропорционально запасам продуктивной влаги в почве.

Глава 3. Пути управления азотным режимом черноземных почв

3.1. Азотный режим черноземов при применении удобрений

В.В. Докучаев [1936, 1949] неоднократно указывал на важность разработки комплекса мер по повышению плодородия черноземных почв: «... безусловно необходимо, чтобы ... все естественные факторы (почва, климат с водой и организмы) были исследованы, по возможности, всесторонне и непременно во взаимной связи. Все эти факторы, лежащие в основе сельского хозяйства, до такой степени тесно связаны между собой, переплетаются друг с другом, до такой степени трудно расчленить их влияние на жизнь человека, что при изучении этих факторов так и особенно при овладении ими, необходимо иметь в виду по возможности всю единую цельную и нераздельную природу, а не отрывочные ее части, необходимо одинаково чтить и штудировать все главнейшие элементы ее, иначе мы никогда не сумеем управлять ими, никогда не будем в состоянии учесть, что принадлежит одному и другому фактору».

Отмечая высокий уровень плодородия черноземных почв, В.В. Докучаев [1899] в статье «К учению о зонах природы» указал, что «как и всюду и всегда, наибольшее значение имеет царь почвы – русский чернозем». Для поддержания высокого уровня плодородия почвы необходим целый комплекс мероприятий: режим землепользования, система удобрений и обработки почвы, система мелиорации и защиты от эрозии.

В отличие от других элементов азот обладает большим разнообразием соединений, мобильностью (миграционной способностью), способностью к быстрой трансформации, которая определяется тепловым и водным режимами почвы, характером растительного покрова, уровнем применения органических и минеральных удобрений. Трансформация азота в почве определяет условия азотного питания растений на протяжении всего периода вегетации, эффективность применения удобрений, уровень продуктивности и качество урожая сельскохозяйственных культур.

Подвижность соединений азота характеризует степень доступности их растениям. Образование и накопление минерального азота в почве зависит от многих факторов, но, прежде всего, от количества и качественного

состава органического вещества. Устойчивое функционирование агроэко-систем обеспечивается созданием оптимальных условий азотного режима почв и питания растений азотом. Оптимизация содержания гумуса и различных форм азота в почве достигается системой удобрения [Щеглов, 1995; Черников и др., 2001; Минакова и др., 2011; 2013; 2016; Громовик, Королев, 2015].

При длительном применении удобрений повышается содержание общего азота на 4-16% и минеральных его форм – на 5-17%. (табл. 43).

Азот аммиачной селитры способствовал повышению содержания минерального азота, тогда как азот навоза – увеличению количества легкогидролизуемой формы [Щербаков, Годунов, 1978]. Под действием навоза содержание легкогидролизуемого азота повышалось на 15-18%. Под действием навоза повышалась ферментативная активность почвы, тогда как под действием минеральных удобрений она не менялась [Ярошевич, 1966; Щербаков и др., 1973].

Содержание минерального азота в черноземе типичном (Тамбовская обл.) повышалось после азотных удобрений, внесенных осенью и весной (табл. 44). Наибольшее количество нитратов в почве весной содержалось при внесении N_{45} , минимальное – на контроле [Иванова, 2013].

При выходе растений в трубку содержание минерального азота снижалось в наибольшей степени при весеннем внесении азотных удобрений в дозе 45кг/га. При двукратном внесении азотных удобрений содержание нитратов и аммония повышалось до 8,8-9,2 мг/кг. При внесении минеральных удобрений в черном пару (чернозем типичный, Белгородская обл.) минеральный азот мигрирует за пределы метрового слоя почвы, поэтому его запасы не превышали 80 кг/га [Азаров и др., 2003], вследствие чего черный пар не обеспечивал максимальной продуктивности озимой пшеницы. В черноземе обыкновенном (Краснодарский край) содержание минерального азота в почве под озимой пшеницей повышалось в начале вегетации растений в слое 0-90 см до 74 кг/га (табл. 45). По мере вегетации его содержание снижалось до 32-57 кг/га в зависимости от доз азотных удобрений. При внесении 60 т/га навоза за ротацию севооборота в почве накапливалось меньшее количество (13–21 кг/га) минерального азота по сравнению с применением минеральных удобрений (20-32кг/га в начале вегетации растений). Азотные удобрения повышали запасы минерального азота в слое почвы 0-90 см на протяжении всего периода вегетации растений.

Таблица 43. Действие удобрений на содержание соединений азота и ферментивную активность в обыкновенном черноземе [Щербаков, Годунов, 1978]

| Вариант | Глубина, см | Азот, мг/кг почвы | | | | | Протеаза, мг N-NH ₄ на 1 г почвы | | Уреазы, мг NH ₃ на 1 г почвы | |
|---------------------------|-------------|-------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|------------------|---|-------|---|------|
| | | общий | минеральный | легкотгид роллизуемый | трудногид роллизуемый | негидроли зуемый | на 1 г почвы | | на 1 г почвы | |
| | | | | | | | 0-20 | 20-40 | 0,18 | 0,10 |
| Без удобрений | 0-20 | 3473 | 48 | 165 | 481 | 2779 | 0,18 | 0,75 | | |
| | 20-40 | 3300 | 42 | 160 | 478 | 2620 | 0,10 | 0,65 | | |
| НРК 1 доза | 0-20 | 3614 | 56 | 171 | 510 | 2877 | 0,18 | 0,72 | | |
| | 20-40 | 3393 | 48 | 164 | 502 | 2679 | 0,12 | 0,56 | | |
| НРК 2 дозы | 0-20 | 4050 | 56 | 165 | 555 | 3274 | 0,16 | 0,73 | | |
| | 20-40 | 3494 | 64 | 157 | 546 | 2729 | 0,09 | 0,59 | | |
| Навоз 1 доза | 0-20 | 3643 | 50 | 191 | 552 | 2850 | 0,22 | 0,79 | | |
| | 20-40 | 3346 | 50 | 185 | 490 | 2621 | 0,14 | 0,70 | | |
| Навоз 2 дозы | 0-20 | 3874 | 53 | 195 | 516 | 3110 | 0,26 | 0,90 | | |
| | 20-40 | 3874 | 53 | 195 | 516 | 3110 | 0,26 | 0,920 | | |
| Навоз ½ дозы + НРК ½ дозы | 0-20 | 3711 | 53 | 188 | 520 | 2950 | 0,23 | 0,77 | | |
| | 20-40 | 3378 | 46 | 166 | 498 | 2668 | 0,12 | 0,68 | | |

Одинарная доза навоза 50 т/га.

Таблица 44. Динамика содержания минерального азота в черноземе типичном по фазам вегетации озимой пшеницы, мг/кг [Иванова, 2013]

| Вариант | Осеннее кущение | | | | | Весеннее кущение | | | | | Выход в трубку | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-----|-----|
| | перед внесением удобрений | | после внесения удобрений | | после внесения удобрений | перед внесением удобрений | | после внесения удобрений | | после внесения удобрений | N-NO ₃ | N-NH ₄ | | |
| | N-NO ₃ | N-NH ₄ | N-NO ₃ | N-NH ₄ | | N-NO ₃ | N-NH ₄ | N-NO ₃ | N-NH ₄ | | | | | |
| Без удобрений | 4,4 | 2,4 | 6,8 | 4,4 | 2,6 | 7,0 | 2,2 | 2,6 | 4,8 | 2,5 | 3,3 | 5,8 | 4,4 | 6,9 |
| | 4,4 | 2,7 | 7,1 | 4,8 | 3,3 | 8,1 | 2,5 | 2,6 | 5,1 | 2,9 | 3,0 | 5,9 | 2,1 | 5,3 |
| Р К ₄₀ – фон | 5,1 | 3,8 | 8,9 | 4,7 | 3,4 | 8,1 | 2,9 | 2,6 | 5,5 | 3,7 | 5,6 | 9,3 | 2,8 | 6,0 |
| Ф+ N ₄₅ весна | 5,2 | 2,6 | 7,8 | 5,1 | 3,2 | 8,3 | 2,5 | 2,6 | 5,1 | 3,5 | 3,5 | 7,0 | 4,0 | 8,7 |
| Ф+ N ₉₀ осень | 4,9 | 3,0 | 7,9 | 6,2 | 5,2 | 11,4 | 3,4 | 4,8 | 8,2 | 2,9 | 3,4 | 6,3 | 4,7 | 9,2 |
| Ф+ N ₁₃₅ 90 весна+45 осень | 5,9 | 3,8 | 9,7 | 6,4 | 5,9 | 12,3 | 3,2 | 4,4 | 7,6 | 2,5 | 3,8 | 6,3 | 4,0 | 8,8 |
| Ф+ N ₁₈₀ 90 весна+90 осень | | | | | | | | | | | | | | |

Таблица 45. Динамика содержания минерального азота в почве под озимой пшеницей, кг/га [Нимбуев, 1999]

| Слой почвы, см | Фазы развития растений | | |
|----------------|---------------------------|-----------|-------------------|
| | начало весенней вегетации | колошение | восковая спелость |
| 0-30 | 13-21 | 11-21 | 10-20 |
| 30-60 | 16-23 | 8-21 | 8-20 |
| 60-90 | 20-32 | 12-21 | 7-28 |
| 0-90 | 51-74 | 34-58 | 32-57 |

Длительное применение органических и минеральных удобрений (зерносвекловичный севооборот с 1936 г., чернозем выщелоченный, Воронежская обл.) повышало содержание гумуса на 0,08% [Минакова и др., 2011]. При этом увеличилась степень гумификации органического вещества и расширился диапазон соотношения $C_{гк} : C_{фк}$.

Внесение на фоне 25 т/га навоза возрастающих доз минеральных удобрений повышало обеспеченность растений минеральным азотом (табл. 46). В начале вегетации сахарной свеклы содержание N – NO₃ в слое почвы 0-20 см повышалось на 42 – 88%, аммонийного азота – на 68 – 87%; в подпахотном слое N-NO₃ – на 67%, а N-NH₄ – 41% соответственно. В ходе вегетации сахарной свеклы содержание нитратов и аммонийного азота снижалось почти в 2 раза.

Таблица 46. Содержание нитратного, аммонийного и минерального азота в черноземе выщелоченном в разные периоды вегетации сахарной свеклы при длительном применении удобрений [Минакова и др., 2011]

| Глубина, см | Начало вегетации | | | Середина вегетации | | | Перед уборкой корнеплодов | | |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-------|--------------------|-------------------|-------|---------------------------|-------------------|-------|
| | N-NO ₃ | N-NH ₄ | Сумма | N-NO ₃ | N-NH ₄ | Сумма | N-NO ₃ | N-NH ₄ | Сумма |
| | мг/кг | | | | | | | | |
| Контроль без удобрений | | | | | | | | | |
| 0-20 | 7,6 | 10,2 | 17,8 | 5,8 | 6,9 | 12,7 | 4,6 | 5,3 | 9,9 |
| 2-40 | 7,3 | 8,3 | 15,6 | 5,5 | 6,4 | 11,9 | 4,0 | 5,3 | 9,3 |
| N45P45K45 + навоз 25 т/га | | | | | | | | | |
| 0-20 | 8,6 | 11,2 | 19,8 | 7,3 | 10,1 | 17,4 | 5,1 | 9,2 | 14,3 |
| 20-40 | 9,0 | 11,6 | 20,6 | 6,2 | 10,4 | 16,3 | 4,2 | 8,2 | 12,4 |
| N90P90K90 + навоз 25 т/га | | | | | | | | | |
| 0-20 | 10,4 | 15,0 | 25,4 | 7,6 | 10,4 | 18,0 | 6,4 | 9,4 | 15,8 |
| 20-40 | 12,2 | 11,7 | 23,9 | 6,5 | 9,4 | 15,9 | 5,5 | 8,2 | 13,7 |
| N135P135K135 + навоз 25 т/га | | | | | | | | | |
| 0-20 | 10,8 | 19,1 | 29,9 | 6,0 | 14,4 | 20,4 | 5,2 | 8,2 | 13,4 |
| 20-40 | 10,3 | 10,3 | 20,6 | 5,6 | 9,2 | 14,8 | 4,8 | 6,4 | 11,2 |

При длительном применении органических и минеральных удобрений меняется подвижность соединений азота в почве (табл. 47).

Таблица 47. Влияние длительного применения удобрений на подвижность азотистых соединений чернозема выщелоченного [Минакова и др., 2011]

| Глубина, см | N _{общ} , мг/кг | N | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------|-----|---------------------|-----|-----------------|----|
| | | легкогидролизующий | | трудногидролизующий | | негидролизующий | |
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Контроль – без удобрений | | | | | | | |
| 0-20 | 2380 | 90,6 | 3,8 | 134 | 5,6 | 2140 | 90 |
| 20-40 | 1880 | 84,7 | 4,5 | 87,7 | 4,7 | 1690 | 90 |
| N45P45K45 + навоз 25 т/га | | | | | | | |
| 0-20 | 2630 | 155 | 5,9 | 146 | 5,6 | 2310 | 88 |
| 20-40 | 1950 | 114 | 5,8 | 137 | 7,0 | 1680 | 86 |
| N90P90K90 + навоз 25 т/га | | | | | | | |
| 0-20 | 2590 | 187 | 7,2 | 171 | 6,6 | 2210 | 85 |
| 20-40 | 2020 | 132 | 6,5 | 130 | 6,4 | 1730 | 86 |

В графе 1 – мг/кг почвы; 2 – % от N_{общ}

Под действием удобрений повышалось содержание легкогидролизующего азота (на 108-139% в слое 0-20 см и на 46 – 66% в слое 20-40 см по отношению к контролю), трудногидролизующего азота (на 27-52% в слое 0-20 см и на 40-57% в слое 20-40см) и снижалось количество негидролизующего азота, что свидетельствует о большой доступности соединений азота растениям.

По прошествии очередной ротации восьмипольного севооборота внесение органических удобрений (5,6 т/га севооборотной площади) и минеральных удобрений повышало содержание N-NO₃ на 42-111% и количество N-NH₄ на 55-120% в слое 0-40 см чернозема выщелоченного в Воронежской области в период формирования первой пары листьев сахарной свеклы (табл. 47а). В фазе смыкания листьев в междурядьях под действием удобрений количество N-NO₃ повышалось на 38-45%, а содержание N-NH₄ – на 54-61% [Минакова и др., 2016]. При максимальном накоплении минерального азота количество N-NO₃ повышалось на 8-51%, а содержание N-NH₄ – на 12 – 71%.

Таблица 47а. Содержание минеральных форм азота в слое 0–40 см почвы в разных фазах развития сахарной свеклы, мг/кг [Минакова и др., 2016]

| Вариант | Первая пара настоящих листьев сахарной свеклы | | | Фаза смыкания листьев в междурядьях | | | Перед уборкой корнеплодов | | |
|------------------------|---|-------------------|--|-------------------------------------|-------------------|--|---------------------------|-------------------|--|
| | N-NO ₃ | N-NH ₄ | N-NO ₃ + N-NH ₄ | N-NO ₃ | N-NH ₄ | N-NO ₃ + N-NH ₄ | N-NO ₃ | N-NH ₄ | N-NO ₃ + N-NH ₄ |
| Контроль без удобрений | 7,4 | 8,2 | 15,6 | 5,6 | 6,7 | 12,3 | 4,3 | 5,3 | 9,6 |
| Навоз 25+N45P45K45 | 8,8 | 10,4 | 19,2 | 6,7 | 9,0 | 15,7 | 4,6 | 6,8 | 11,4 |
| Навоз 25+N90P90K90 | 11,3 | 10,3 | 21,6 | 7,0 | 9,2 | 16,2 | 6,0 | 7,0 | 13,0 |
| Навоз 25+N135P135K135 | 10,5 | 11,5 | 22,0 | 5,8 | 9,3 | 15,1 | 5,0 | 6,5 | 11,5 |
| Навоз 50+N45P45K45 | 11,3 | 12,7 | 24,0 | 7,7 | 10,3 | 18,0 | 4,9 | 7,2 | 12,1 |
| Навоз 25+N90P45K45 | 10,5 | 10,7 | 21,2 | 5,4 | 8,9 | 14,3 | 4,4 | 6,6 | 11,0 |
| N190P190K190 | 13,5 | 18,0 | 31,5 | 7,3 | 1,8 | 18,1 | 6,2 | 7,8 | 14,0 |
| Навоз 50+N150P150K150 | 15,6 | 12,8 | 28,4 | 8,1 | 9,4 | 17,5 | 5,0 | 7,4 | 12,4 |

В ходе вегетации сахарной свеклы снижение запасов минерального азота в первой половине вегетации проходило при внесении высоких доз минеральных удобрений, во второй – при применении больших доз навоза. При этом в первой половине вегетации наиболее интенсивно снизились запасы нитратного азота, во второй – аммонийного азота [Минакова и др., 2011, 2016]. В период от первой пары настоящих листьев к фазе смыкания листьев в междурядьях запасы N-NO₃ снижались на 27-74% и от фазы смыкания к уборке – на 25-49%.

На азотный режим черноземных почв существенно влияет не только азот удобрений, но и азот других источников (симбиотическая и несимбиотическая азотфиксация, растительные остатки, семена, атмосферные осадки) (табл. 48). Минимальное количество азота (341 кг/га) поступало в почву, когда удобрения не применяются вовсе, максимальное (966 кг/га) – при внесении навоза (50 т/га) и N₁₅₀P₁₅₀K₁₅₀.

Наибольшее количество азота в севооборот поступало с минеральными удобрениями (90-380 кг/га), несколько меньше с ПКО возделываемых культур (165-240 кг/га) и навозом (125-250 кг/га). Удобрения повышали поступление азота в почву: с ПКО – на 3-39%; за счет симбиотической азотфиксации однолетних трав – в 1,4-1,6 раза. В целом, за 9 лет поступало 581-966 кг/га севооборотной площади, что в 1,7-2,8 раза больше, чем в контроле.

Таблица 48. Поступление азота в почву севооборота, 8-я ротация, кг/га [Минакова и др., 2016]

| Вариант | Поступление азота в почву из разных источников | | | | | | | | Сумма |
|------------------------|--|-----|-----|------|----|------------------|------------------|------|-------|
| | МУ | ОУ | РО | С | АО | СМО ₁ | СМО ₂ | НМО | |
| Контроль без удобрений | 0 | 0 | 155 | 30,1 | 50 | 50,6 | 11,6 | 43,6 | 341 |
| Навоз 25+N45P45K45 | 90 | 125 | 160 | 30,1 | 50 | 71,0 | 11,3 | 43,6 | 581 |
| Навоз 25+N90P90K90 | 180 | 125 | 167 | 30,1 | 50 | 71,8 | 13,5 | 43,6 | 681 |
| Навоз 25+N135P135K135 | 270 | 125 | 215 | 30,1 | 50 | 73,4 | 11,1 | 43,6 | 819 |
| Навоз 25+N90P45K45 | 180 | 125 | 184 | 30,1 | 50 | 71,0 | 10,8 | 43,6 | 694 |
| N190P190K190 | 380 | 0 | 215 | 30,1 | 50 | 77,6 | 13,2 | 43,6 | 809 |
| Навоз 50+N150P150K150 | 300 | 250 | 197 | 30,1 | 50 | 80,7 | 14,2 | 43,6 | 966 |

Примечание. МУ – поступление с азотными удобрениями, ОУ – поступление с органическими удобрениями, РО – поступление с растительными остатками, АО – поступление с атмосферными осадками, С – поступление с семенами, СМО₁ – фиксация симбиотическими микроорганизмами с однолетними травами, СМО₂ – фиксация симбиотическими микроорганизмами с горохом, НМО – фиксация несимбиотическими микроорганизмами.

Наибольшее отчуждение азота тесно связано с потреблением его растениями из удобрений и почвы (541-695 кг N/га за 9 лет) (табл. 49). Органические и минеральные удобрения повышали потребление азота растениями на 11-25% [Минакова и др., 2016].

**Таблица 49. Баланс азота в почве севооборота, 8-я ротация кг/га
[Минакова и др., 2016]**

| Вариант | Вынос | | | | | Баланс |
|------------------------|------------|--------------|------------|-------------------------|-----------------|--------|
| | продукцией | смывом почвы | сорняка-ми | внутри-почвенным стоком | денитрификацией | |
| Контроль без удобрений | 547 | 0 | 47,2 | 18,0 | 1,5 | 273 |
| Навоз 25+N45P45K45 | 608 | 0 | 47,2 | 18,0 | 13,5 | 106 |
| Навоз 25+N90P90K90 | 695 | 0 | 47,2 | 18,0 | 27,0 | 106 |
| Навоз 25+N135P135K135 | 651 | 0 | 47,2 | 18,0 | 40,5 | +62 |
| Навоз 25+N90P45K45 | 671 | 0 | 47,2 | 18,0 | 27,0 | -69 |
| N190P190K190 | 673 | 0 | 47,2 | 18,0 | 57,0 | +114 |
| Навоз 50+N150P150K150 | 659 | 0 | 47,2 | 18,0 | 45,0 | +196 |

Максимальное количество азота (695 кг/га) культуры севооборота потребляли при внесении навоза (25 т/га) и $N_{90}P_{90}K_{90}$. Значительное количество азота (673 кг/га) растения потребляли при внесении одних минеральных удобрений ($N_{190}P_{190}K_{190}$). Из-за слабой засоренности полей сорняки потребляли 47,2 кг/га азота за ротацию на 8-ми полях, занятых культурами севооборота. За счет денитрификации терялось 13,5-57 кг N/га в зависимости от доз применяемых удобрений.

Положительный баланс азота в севообороте складывался при внесении навоза 25 т/га + $N_{135}P_{135}K_{135}$ и навоза 50 т/га + $N_{150}P_{150}K_{150}$ (62 и 196 кг N/га соответственно). Слабоположительный баланс азота складывался при применении одних минеральных ($N_{190}P_{190}K_{190}$) удобрений. В большинстве вариантов складывался отрицательный баланс азота. Наихудшая ситуация складывается при внесении 25 т/га навоза и $N_{45-90}P_{45-90}K_{45-90}$ (-106 кг N/га), что связано с недостаточным поступлением элемента в почву.

Нитратный азот является основной формой питания растений в степных районах Поволжья (чернозем южный, Саратовская обл.) Наибольшее количество $N-NO_3$ накапливается в пару перед посевом озимых культур. За 15 лет в южном черноземе на фоне без удобрений содержится 18,1 мг $N-NO_3$, после озимых, кукурузы и проса – 8,5 мг $N-NO_3$ /кг [Чуб, 1989]. В течение 30 лет за ротацию севооборота запасы нитратного азота достигали 39–41 кг/га [Чуб и др., 2005]. В засушливые годы региона после непаровых предшественников содержание $N-NO_3$ достигает 17-18 мг/кг, после высокоурожайных предшественников снижается до 1-3 мг/кг.

Систематическое применение минеральных азотных удобрений повышает содержание минерального азота в южном черноземе до 10-14 мг/кг при внесении N_{40-60} в паровом поле. На выщелоченном черноземе (Западная Сибирь) применение N_{45} в течение 17 лет повышало содержание в почве общего азота и подвижных его форм [Широких, 1976; Храмцов, Безвиконный, 1998]. При длительном внесении минеральных азотных удобрений (30 лет) содержание нитратного азота в южном черноземе (Саратовская обл.) повышалось на 21-43% [Чуб и др., 2005]. При этом систематическое длительное применение азотных удобрений не влияло на содержание аммонийного азота в почве. Значительное количество $N-NH_4$ в южном черноземе накапливается только в осенний период при низких температурах [Бутняков, 1927]. Основные же потери соединений азота происходят за счет гидролизующихся

повышенных доз азотных удобрений, более активно разрушаются фракции труднорастворимых соединений азота [Чуб и др., 2005].

Характер распределения минерального азота по почвенному профилю зависит от дозы применяемых азотных удобрений. Так, количество минерального азота в черноземе типичном (Башкортостан) при внесении возрастающих доз удобрений повышалось на 38-209 кг/га [Середа, 1999]. С увеличением дозы азотных удобрений усиливалась миграция NO_3^- в глубокие слои почвенного профиля: соотношение $\text{N-NO}_3^- : \text{N-NH}_4^+$ в слоях 0-20, 20-40 и 40-60 см менялось как 2:1, 1:1, 1:0,7 соответственно.

Одним из важнейших приемов регулирования рационального использования почвенных ресурсов и питательных веществ удобрений, а также эффективности азотных удобрений является локальный способ их внесения [Соколов, 1980; Трапезников, 1983; Соколов, Семенов, 1992]. При ленточном внесении удобрений в почве создаются очаги высокой концентрации азота и специфические условия процессов азотного обмена. Так, количество дополнительно минерализованного азота в пахотном слое при ленточном внесении удобрений сокращается на 8-50 кг/га [Середа, 1999]. В черноземе типичном при ленточном внесении удобрений в период всходов яровой пшеницы накапливалось 370 кг/га минерального азота в метровом слое, тогда как при разбросном – 398 кг/га. Наибольшее количество минерального азота образуется в почве при более длительном взаимодействии удобрений с почвой, т.е. при осеннем внесении. При этом большее количество минерального азота находится в более глубоких слоях почвы, который успешно используется озимыми культурами [Соколов, Семенов, 1982].

При локальном внесении азотных удобрений (аммонийная, амидная форма) в почве создается концентрированный очаг минерального азота, в котором в течение 30-40 суток преобладает аммонийная форма азота [Соколов, 1980; Соколов и др., 1983; Мергель и др., 1987; Соколов, Семенов, 1992].

В условиях выщелоченного чернозема (Воронежская обл.) очаг повышенной концентрации N-NH_4 в почве сохранялся больше 30 дней, внесение ингибитора нитрификации КМП продлевало этот срок до двух месяцев (табл. 50).

Таблица 50. Динамика содержания обменного аммония, мг/кг почвы [Свистова и др., 2003]

| Вариант | Время после внесения удобрений, сутки | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|------|-----|------|------|
| | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 |
| Без внесения азота (контроль) | 1,5 | 5,5 | 8,1 | 1,9 | 11,0 |
| Мочевина | | | | | |
| Вразброс | 31,0 | 9,5 | 5,9 | 1,4 | 17,3 |
| Локально (очаг) | 233 | 243 | 131 | 39,6 | 22,6 |
| Локально+КМП (очаг) | 187 | 366 | 238 | 237 | 47,4 |
| Сульфат аммония | | | | | |
| Вразброс | 30,7 | 18,0 | 8,4 | 5,6 | 13,7 |
| Локально (очаг) | 684 | 316 | 240 | 166 | 34,7 |

При локальном внесении сульфата аммония концентрация NH_4^+ в очаге в 1,3-3 раза превышала его содержание при внесении мочевины в течение первых 8-ми суток. А очаг повышенной содержания NH_4^+ сохраняется в течение 2-х месяцев.

При разбросном внесении мочевины и сульфата аммония количество NO_3^- повышалось в 3 и 2 раза соответственно уже на 4-е сутки (табл. 51).

**Таблица 51. Динамика содержания нитратов, мг/кг почвы
[Свистова и др., 2003]**

| Варианты | Время после внесения удобрений, сутки | | | | |
|------------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|
| | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 |
| Без внесения удобрений | 33,7 | 26,7 | 24,4 | 24,6 | 34,2 |
| Мочевина | | | | | |
| Вразброс | 79,7 | 101 | 108 | 57,0 | 10,7 |
| Локально (очаг) | 46,3 | 54,4 | 247 | 368 | 19,9 |
| Локально+КМП (очаг) | 51,9 | 24,6 | 26,2 | 19,9 | 49,7 |
| Сульфат аммония | | | | | |
| Вразброс | 64,8 | 80,3 | 125 | 57,1 | 34,2 |
| Локально (очаг) | 53,4 | 48,8 | 135 | 227 | 29,7 |

При локальном внесении мочевины процесс нитрификации тормозился в течение 14 суток. Ингибитор КМП практически подавлял процесс нитрификации в течение 2-х месяцев. При локальном внесении сульфата аммония процесс нитрификации в очаге подавлялся с большей силой по сравнению с мочевиной. При локальном внесении азотных удобрений миграция ионов NH_4^+ из очага оставалась на низком уровне [Щербаков и др., 1992; Стахурлова и др., 1996].

3.2. Иммобилизация азота удобрений в черноземных почвах

В синтезе и накоплении органического вещества в почве активное участие принимает азот минеральных удобрений. При внесении азотных удобрений в почве устанавливается динамическое равновесие процессов иммобилизация D минерализация D реиммобилизация, результатом которых является размер иммобилизованного азота в ходе выращивания сельскохозяйственных культур. При выращивании сельскохозяйственных культур на черноземах в почве закрепляется 10-60% азота удобрения [Смирнова и др., 1976]. Иммобилизация азота удобрения связана с его участием в физических, физико-химических и биохимических процессах, одновременно протекающих в почве в твердой, живой, жидкой и газовой фазах. К этим процессам относятся: фиксация глинными минералами, включение в органическое вещество, поглощение микроорганизмами и корнями растений [Могилевкина, 1964; Турчин, 1972; Кореньков, Лаврова, 1973; Сапожников и др., 1976; Королева, 1988]. Только благодаря методу изотопной индикации представляется возможность определить с высокой точностью (0,2 относительных %) участие тяжелого изотопа азота ^{15}N в процессах его трансформации в почве.

Методом изотопной индикации установлено, что 11-60% внесенного азота удобрения закрепляется в черноземных почвах России [Смирнова и др., 1976; Лукин, 1992]. Количество иммобилизованного азота удобрения зависит от многих факторов: вида возделываемой культуры; подтипа чернозема; формы, дозы, способа и срока применения удобрений; погодных условий (табл. 52,

53). Максимальное количество азота удобрения (60% от внесенной дозы) закрепляется в лугово-черноземной почве при выращивании риса; минимальное (11-13%) – в черноземе типичном (Белгородская обл.) и черноземе оподзоленном (Новосибирская обл.) при выращивании сахарной свеклы и картофеля соответственно. При выращивании озимой пшеницы в почве закрепляется 12-41% азота удобрения, тогда как при выращивании яровых зерновых – 18-48%. Если брать по культурам, то наименьшее количество азота удобрения закрепляется в черноземах при выращивании картофеля, наибольшее – риса; при выращивании остальных культур – в пределах 33-38%. Среднее значение иммобилизации азота удобрения в черноземах при возделывании сельскохозяйственных культур составляет 22-36% от применяемой дозы.

Таблица 52. Размеры иммобилизации азота минеральных удобрений в черноземных почвах, % от применяемой дозы (по результатам исследований с ^{15}N)

| Почва, регион | Сельскохозяйственная культура | Форма и доза азотного удобрения | Количество закрепленного азота в почве | Автор, год |
|--|-------------------------------|---------------------------------|--|----------------------|
| Чернозем оподзоленный, Новосибирск обл. | картофель | Na, 30-120 | 13-33 | Назарюк, 1989 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирск обл. | | Na, 60 | 17-24 | Назарюк, 1989 |
| Чернозем южной карбонатный, Крым | Кукуруза (зерно) | Na, 900 мг/сосуд | 27-37 | Русинова, 1973 |
| Чернозем типичный, Ростовская обл. | Озимая пшеница (без орошения) | Na, 60-120 | 12-24 | Смирнов, 1977 |
| Чернозем предкавказский, Ставропольский край | | Naa, 60 | 32-41 | Смирнов, 1977 |
| Чернозем типичный, Харьковская обл. | | Naa, 90 | 25-41 | Юрко, 1988 |
| Чернозем предкавказский, Ставропольский край | Озимая пшеница (при орошении) | Naa, 60,120 | 28-35 | Смирнов, 1977 |
| Лугово-черноземная, Краснодарский край | рис | Nm, Na, 120 | 26-47 | Бочкарев, 1984 |
| Лугово-черноземная, Краснодарский край | | Nm, Na, 120 | 19-60 | Смирнова и др., 1976 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | Nc, 120 | 26-34 | Лукин, 1992 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | Nc, 120 | 16-24 | Лукин, 1992 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | Nc, 120 | 11-18 | Лукин, 1992 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | Nc, 120 | 22-26 | Лукин, 1999 |
| Чернозем южный карбонатный, Крым | Яровая пшеница | Na, 90-2700 мг/сосуд | 22-26 | Русинова, 1978 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | Naa, Na, 90 | 32-48 | Гамзиков, 2013 |
| Лугово-черноземная, Курганская обл. | Яровая пшеница | Nm, 80 | 18-40 | Овсянников, 1991 |
| Чернозем предкавказский, Ставропольский край | Ячмень | Naa, 40-120 | 22-32 | Смирнов, 1977 |

Таблица 53. Размеры иммобилизации азота удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур на черноземных почвах

| Культура | Азот удобрения, % от применяемой дозы |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Картофель | 15-28 |
| Кукуруза, зерно | 27-37 |
| Озимая пшеница, без орошения | 23-35 |
| Озимая пшеница, при орошении | 28-35 |
| Рис | 18-54 |
| Сахарная свекла | 23-33 |
| Яровая пшеница | 24-38 |
| Ячмень | 24-38 |
| Среднее от меньшего к большему | 22-36 |
| Общее среднее | 29 |

Азот, входящий в состав органического вещества и определяющий его запас в почве, находится в различной форме связей с молекулами гумусовых соединений, что в свою очередь определяет степень его подвижности и участия в процессах трансформации. Характер его распределения по группам и фракциям почвенного гумуса зависит от генетических признаков почв. Так, почвы с низким уровнем плодородия (дерново-подзолистые) отличаются от почв с высоким уровнем (черноземы) не только по содержанию органического азота, но и по фракционному составу [Руделёв, 1992].

Характер закрепления меченого азота ^{15}N удобрения соответствует характеру распределения природного органического азота различных типов почв (табл. 54). Например, в дерново-подзолистой суглинистой почве 37,6% от общего закрепленного азота удобрения включается в группу фульвокислот, а основная его масса иммобилизовалась в легкоминерализуемых фракциях декальценита и фракции 1 фульвокислот. В группе гуминовых кислот 14,2% приходится на фракцию свободных и рыхлосвязанных гуминовых кислот (фракция 1). Таким образом, в почвах дерново-подзолистого типа наибольшее накопление вновь иммобилизованного азота удобрения происходит в легкогидролизуемых фракциях фульвокислот и гуминовых кислот.

В отличие от почв дерново-подзолистого типа в черноземах (Курская обл.) вновь иммобилизованный азот удобрения в большей степени (32%) закрепляется в гуминовых кислотах (фракция 2). При этом снижается как абсолютное, так и относительное закрепление ^{15}N в фульвокислотах. Общее количество иммобилизованного ^{15}N в фульвокислотах снижается более чем в 2 раза по сравнению с дерново-подзолистой почвой.

Таблица 54. Содержание азота удобрения в фракциях органического вещества дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного [Руделёв, 1992]

| Почва, регион | Иммобилизованный азот удобрения | Гуминовые кислоты | | | Фульвокислоты | | | | | гумины | ГК:ФК | |
|--|---------------------------------|-------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------|
| | | фракции | | | сумма | фракции | | | | | | сумма |
| | | 1 | 2 | 3 | | 1а | 1 | 2 | 3 | | | |
| Дерново-подзолистая суглинистая, Московская обл. | 684,6 * 100 | 97,7 14,2 | нет | 21,9 3,2 | 119,6 17,4 | 44,8 6,6 | 135,9 19,8 | 54,6 7,9 | 21,9 3,2 | 257,3 37,6 | 189,4 27,7 | 0,45 |
| Чернозем типичный, Курская обл. | 657,0 100 | 25,1 3,8 | 156,2 23,8 | 28,9 4,4 | 210,2 32,0 | 42,2 6,4 | 40,5 6,2 | 16,6 2,5 | 22,7 3,5 | 122,0 18,6 | 271,0 41,2 | 1,72 |

* Числитель: мг/лизиметр; знаменатель: % от закрепленного азота

Соотношение содержания ^{15}N удобрения и азота почвы в фракциях гумуса определяет характер иммобилизации азота удобрения в процессе его трансформации в почве (табл. 55). В дерново-подзолистой почве происходит наиболее значительное обогащение ^{15}N фракции 2 фульвокислот, в то время как в черноземе – фракции 1а. В процессе иммобилизации снижается степень обогащения почвенного азота ^{15}N удобрения от легкогидролизуемых к трудногидролизуемым фракциям гуминовых кислот.

Таблица 55. Соотношение относительного содержания азота удобрения и азота почвы в фракциях гумуса [Руделёв, 1992]

| Почва, регион | Гуминовые кислоты | | | Фульвокислоты | | | | Негидролизующий остаток |
|--|-------------------|------|------|---------------|------|------|------|-------------------------|
| | фракции | | | фракции | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1а | 1 | 2 | 3 | |
| Дерново-подзолистая суглинистая, Московская обл. | 1,16 | | 0,86 | 0,82 | 1,35 | 2,19 | 0,23 | 1,01 |
| Чернозем типичный, Курская обл. | 1,13 | 0,85 | 0,37 | 1,63 | 1,11 | 0,57 | 0,56 | 1,08 |

При внесении в почву (чернозем выщелоченный, Воронежская обл.) аммиачной селитры ($^{15}\text{NH}_4$ $^{15}\text{NO}_3$) через 25-30 дней значительно снижается количество азота удобрения в доступной для растений форме (табл. 56). Снижение содержания минерального азота удобрения происходит в основном за счет процессов иммобилизации. Так, уже в начале вегетации растений 52,6% внесенного азота включалось в состав органических азотсодержащих веществ почвы.

Таблица 56. Закрепление азота удобрения во фракциях органического азота выщелоченного чернозема при выращивании сахарной свеклы, % [Бондаренко, 1989]

| Удобрения, кг/га | Обнаруж. в почве азота удобр. | Минеральный | Фракции органического азота | | | | негидролизующий |
|----------------------------|-------------------------------|-------------|-----------------------------|--------------|---------------------|--------------|-----------------|
| | | | легкогидролизуемый | | трудногидролизуемый | | |
| | | | отгоняемый | неотгоняемый | отгоняемый | неотгоняемый | |
| В фазе трех пар листьев | | | | | | | |
| Φ^*N_{50} | 59,3 | 17,6 | 4,9 | 3,2 | 6,8 | 16,4 | 10,4 |
| Φ^*N_{100} | 69,2 | 37,4 | 4,6 | 2,0 | 5,9 | 13,8 | 5,5 |
| Φ^*N_{150} | 66,1 | 38,3 | 3,9 | 2,0 | 6,8 | 10,6 | 4,5 |
| Φ^*N_{200} | 65,4 | 44,3 | 3,2 | 1,9 | 5,5 | 7,0 | 3,5 |
| В конце июля | | | | | | | |
| Φ^*N_{50} | 46,2 | 2,2 | 4,1 | 4,8 | 8,6 | 16,4 | 10,1 |
| Φ^*N_{100} | 31,6 | 3,2 | 3,0 | 2,8 | 4,9 | 10,9 | 6,8 |
| Φ^*N_{150} | 33,7 | 5,9 | 2,7 | 2,7 | 5,5 | 10,6 | 6,3 |
| Φ^*N_{200} | 30,1 | 5,5 | 2,4 | 2,5 | 4,7 | 9,7 | 5,3 |
| При уборке сахарной свеклы | | | | | | | |
| Φ^*N_{50} | 36,2 | 3,1 | 4,0 | 4,8 | 6,0 | 10,3 | 8,0 |
| Φ^*N_{100} | 34,9 | 2,1 | 3,4 | 3,9 | 6,9 | 11,7 | 6,8 |
| Φ^*N_{150} | 37,4 | 3,8 | 3,0 | 3,5 | 6,2 | 14,0 | 6,9 |
| Φ^*N_{200} | 34,6 | 2,5 | 3,6 | 3,5 | 6,4 | 12,5 | 6,1 |

* Φ – фон $P_{150} K_{150}$

С увеличением доз азота относительное количество иммобилизованного азота снижалось до 22,4% [Бондаренко, 1989].

Азот удобрения уже в начале вегетации растений включается в состав всех фракций органического азота. Около 10% внесенного азота иммобилизовалось в отгоняемых фракциях легко- и трудногидролизуемого азота. Процессы трансформации иммобилизованного азота удобрения в фракциях органического азота в ходе вегетации сахарной свеклы протекают в зависимости от доз азота. При минимальной дозе азота они направлены на снижение ^{15}N в негидролизуемой и трудногидролизуемой фракциях, т.е. в этих условиях преобладали процессы реминерализации над иммобилизацией.

При повышенных дозах азота (100-200 кг/га) процессы трансформации иммобилизованного меченого азота направлены на повышение как абсолютного, так и относительного количества ^{15}N в сложных гумусовых соединениях. В конце вегетации сахарной свеклы 50% фракций свежемобилизованного легкогидролизуемого меченого азота и более 60% трудногидролизуемого представлены неотгоняемыми соединениями. При оптимальных и повышенных дозах азота удобрения в почве во второй половине периода вегетации растений преобладают процессы иммобилизации меченого азота.

Снижение количества ^{15}N в отгоняемых соединениях легко- и трудногидролизуемого азота свидетельствует о большей мобильности вновь образованной части этих фракций. В конце вегетации растений 25-29% иммобилизованного азота удобрения находилось в составе азотсодержащих соединений почвы, дающих при гидролизе аммоний. После уборки урожая сахарной свеклы в слое почвы 0-50 см в составе органических соединений азота находилось 42-43% меченого азота от применяемой дозы и 32-34% в пахотном слое почвы.

На фоне длительного и систематического применения минеральных удобрений иммобилизация вновь внесенного азота удобрения в почвах Западной Сибири снижалась (таб. 57). На неудобренном фоне закрепление в почве вновь внесенного азота удобрения на 5-6% больше по сравнению с удобряемым фоном.

Таблица 57. Влияние предшествующей удобренности почв Западной Сибири на иммобилизацию азота удобрения, % от внесенного [Гамзиков и др., 1985]

| Почва | Неудобренный фон | Удобренный фон |
|-----------------------|------------------|----------------|
| Дерново-подзолистая | 22-48 | 20-43 |
| Серая лесная | 26-32 | 24-25 |
| Чернозем выщелоченный | 26-33 | 25-27 |

Азот удобрений, участвующий в образовании и накоплении органических азотсодержащих соединений, оказывается более подвижным и может составлять основную часть иммобилизованного азота, используемого растениями в последствии. Степень использования иммобилизованного азота удобрения растениями в первый год последствия составляет 1,8-8,2% от применяемой дозы азота и резко снижается на второй год последствия (0,7-0,9%) [Руделёв, 1992; Соколов, Семенов, 1992]. Это вызвано тем, что в первый год после действия часть иммобилизованного ^{15}N закрепляется в

периферических частях молекул гумусовых веществ, поэтому он относительно более подвижен. По мере «старения» гумусовых веществ азот переходит в состав циклических соединений гумуса, что снижает степень его минерализации. В ходе последействия в процессе дальнейшей трансформации азота удобрения происходят изменения содержания ^{15}N в органических соединениях почвы (табл. 58).

Таблица 58. Изменение содержания ^{15}N в фракциях органического вещества различных почв в последействии азотных удобрений [Руделёв, 1992]

| Почва, регион | Содержание ^{15}N в почве | Гуминовые кислоты | | | | Фульвокислоты | | | | | негидролизуемый остаток |
|--|------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| | | фракции | | | сумма | фракции | | | | сумма | |
| | | 1 | 2 | 3 | | 1а | 1 | 2 | 3 | | |
| Дерново-подзолистая суглинистая, Московская обл. | $\frac{684,6}{584,7}$ | $\frac{97,7}{84,0}$ | нет | $\frac{21,9}{21,1}$ | $\frac{119,6}{105,1}$ | $\frac{44,8}{34,8}$ | $\frac{135,9}{97,5}$ | $\frac{54,6}{71,3}$ | $\frac{21,9}{21,7}$ | $\frac{257,3}{225,3}$ | $\frac{189,4}{176,1}$ |
| Чернозем типичный, Курская обл. | $\frac{657,0}{397,0}$ | $\frac{25,1}{21,1}$ | $\frac{156,2}{83,4}$ | $\frac{28,9}{29,2}$ | $\frac{210,2}{133,7}$ | $\frac{42,2}{17,1}$ | $\frac{40,5}{24,4}$ | $\frac{16,6}{1,3}$ | $\frac{22,7}{22,2}$ | $\frac{122,0}{65,0}$ | $\frac{271,0}{172,0}$ |

* Числитель – содержание ^{15}N в почве в год внесения; знаменатель – содержание ^{15}N в почве после 2-х лет последействия.

В ходе трансформации меченого азота в дерново-подзолистой почве выявилось две особенности: первая – наибольшей минерализации подвержен азот легкогидролизуемой части фракции фульвокислот и вторая – одновременно происходит перегруппировка ^{15}N в трудногидролизуемых фракциях фульвокислот. Поэтому наряду с процессами минерализации идут процессы синтеза более сложных органических соединений.

Реминерализация органического ^{15}N в черноземе типичном идет быстрее в тех фракциях, органические соединения которых минерализуются легче. В фульвокислотах это соединение фракции 1а, 1 и 2, в гуминовых кислотах – это фракция 2.

В отличие от дерново-подзистой почвы в черноземе процессы реминерализации проходят более активно и затрагивают трудногидролизуемые соединения почвенного гумуса (табл. 59).

Таблица 59. Минерализация иммобилизованного азота ^{15}N в различных почвах [Руделёв, 1992]

| Почва, регион | Минерализовано за 2 года | В том числе | | | |
|--|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|
| | | ГК | ФК | гумины | неидентифицированный азот |
| Дерново-подзолистая суглинистая, Московская обл. | $\frac{99,9}{100}$ | $\frac{15,5}{15,5}$ | $\frac{37,9}{31,9}$ | $\frac{13,3}{13,3}$ | $\frac{32,3}{39,3}$ |
| Чернозем типичный, Курская обл. | $\frac{260}{100}$ | $\frac{76,5}{29,0}$ | $\frac{57,0}{21,9}$ | $\frac{99,0}{38,1}$ | $\frac{27,5}{11}$ |

Числитель – мг/лизиметр; знаменатель – % от внесённой дозы.

Характер трансформации иммобилизованного азота удобрения определяет его баланс в системе «почва-растение» (табл. 60).

Таблица 60. Баланс иммобилизованного азота удобрения в системе «почва-растение» [Руделёв, 1992]

| Почва, регион | Содержание ^{15}N в почве | Использование растениями иммобилизованного ^{15}N | | | Иммобилизовано в почве | Потери, % |
|--|------------------------------------|--|--------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| | | 1 год | 2 год | всего | | |
| Дерново-подзолистая суглинистая, Московская обл. | $\frac{684,0}{100}$ | $\frac{71,4}{10,4}$ | $\frac{26,7}{3,9}$ | $\frac{98,1}{14,3}$ | $\frac{584,7}{85,4}$ | 0,3 |
| Чернозем типичный, Курская обл. | $\frac{657,0}{100}$ | $\frac{34,1}{5,2}$ | $\frac{4,6}{0,7}$ | $\frac{38,7}{5,9}$ | $\frac{397,0}{60,4}$ | 33,7 |

* Числитель – мг/лизиметр; знаменатель – % от общего количества азота удобрения.

В первый год последействия растения использовали 10% иммобилизованного азота удобрения на дерново-подзолистой почве и 5% – на черноземе. На второй год последействия резко снижается использование иммобилизованного ^{15}N растениями (3,0 и 0,7% соответственно), что, по-видимому, обусловлено стабилизацией процессов трансформации азота удобрения. Основное количество иммобилизованного азота закрепляется органическим веществом почв (85 и 60%). Высокие потери иммобилизованного азота в черноземе (34%) по сравнению с дерново-подзолистыми почвами (0,3%) обусловлены активностью микробного сообщества. Степень использования иммобилизованного азота растениями может меняться в зависимости от действия антропогенных факторов. Так, внесение азотных минеральных удобрений усиливает использование иммобилизованного азота растениями, тогда как внесение навоза – замедляет.

По результатам длительных опытов содержание общего азота в черноземах повышалось под действием навоза на 13-25%, под действием минеральных удобрений – на 13% (табл. 61). Наибольшее количество общего азота содержалось в деградированном черноземе (Прага – Рузине, Чехия); под действием компоста (80, 160 т/га ежегодно) в течение 18 лет содержание азота в почве повышалось в 2,5 раза, тогда как под действием минеральных удобрений – на 44% [Шевцова, 1998]. При внесении минеральных удобрений в условиях среднемошного тяжелосуглинистого чернозема (Красноярский край) в течение 5 лет содержание общего азота в почве повышалось на 13%. При внесении навоза в условиях деградированного чернозема (Ростовская обл.) в течение 10 лет содержание общего азота снизилось на 12%, тогда как при внесении минеральных удобрений – на 9%.

Таблица 61. Влияние длительного применения удобрений на содержание общего азота в пахотном слое черноземных почв [Шевцова, 1998]

| Почва, регион, период исследований | Возделываемая культура | Удобрение | Общий азот | |
|--|------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------|
| | | | % на воздушно-сухую массу почвы | Прибавка к контролю, % |
| Чернозем выщелоченный, Украина, 57 лет | Кукуруза | навоз | 0,229 | 15 |
| Карбонатный мощный чернозем, Молдавия, 14 лет | Кукуруза | навоз | 0,263 | 25 |
| Чернозем выщелоченный, Мордовия, 14 лет | Зерновые | навоз | 0,643 | 13 |
| Чернозем тяжелосуглинистый, Венгрия, 17 лет | Зерновые | НРК | 0,181 | 16 |
| Черноземовидная глинисто-песчаная, Германия, 100 лет | Озимая рожь | навоз | 0,182 | 109 |
| | Озимая рожь | НРК | 0,108 | 24 |
| Деградированный чернозем, Чехия, 18 лет | Бессменный пар | компост | 0,439 | 254 |
| | Бессменный пар | НРК | 0,179 | 44 |
| Чернозем среднemosный, Красноярский край, 5 лет | Зерновые | НРК | 0,403 | 13 |

В процессе трансформации азота в почве происходит фракционирование его изотопов. Для оценки степени изменения изотопного состава азота почвы предложено показать $\Delta^{15}\text{N}$, который определяется как отношение избытка концентрации $\Delta^{15}\text{N}$ в азоте исследуемой пробы к концентрации ^{15}N в азоте стандарта. Величина $\Delta^{15}\text{N}$ зависит от степени завершенности и интенсивности фракционирования для каждого процесса трансформации азота. Это в свою очередь позволяет использовать явление изотопной сепарации для оценки интенсивности и направленности превращения азота в почве и в экосистеме в целом.

При длительном использовании черноземных почв происходит обогащение их тяжелым изотопом азота ^{15}N . Наиболее обогащенной становится почва в пару при внесении навоза ($\Delta^{15}\text{N}$ 37,3%) в результате газообразных потерь азота в процессе денитрификации, поскольку газообразные соединения азота обеднены ^{15}N , а оставшиеся в почве азотсодержащие вещества обогащаются ^{15}N . При длительном применении минеральных удобрений (более легких по изотопному составу по сравнению с изотопом почвы) происходит обеднение азота изотопом ^{15}N .

Иммобилизация азота минеральных удобрений зависит от применения органических удобрений (табл. 62). Так, в условиях типичного чернозема (Белгородская обл.) при выращивании озимой пшеницы внесение стоков свиноводческого комплекса (100 кг N/га) усиливало закрепление в 2 раза ^{15}N мочевины в почве, что, по-видимому, связано с усилением микробиологической деятельности и с повышением соотношения C: N.

Таблица 62. Иммобилизация азота мочевины при использовании стоков свиноводческого комплекса

| Вариант | Иммобилизация азота | |
|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| | г/м ² | % от применяемой дозы |
| P ₆₀ K ₆₀ – фон | - | - |
| Фон + ¹⁵ Nм | 1,66 | 28 |
| Фон + ¹⁵ Nм + ССК * | 3,30 | 55 |

* ССК – стоки свиноводческого комплекса.

В тех же условиях (чернозем типичный, Белгородская обл.) при выращивании озимой пшеницы наименьшее количество азота закреплялось в почве при внесении мочевины (N₆₀) (табл. 63). При внесении биомассы горчицы белой, меченой ¹⁵N, в дозе 60 кг N/га закрепление ее азота в почве возрастало в 2 раза. При совместном внесении биомассы горчицы и мочевины (20 кг N/га) закрепление азота горчицы в почве снижалось в 1,3 раза, что свидетельствует об усилении процессов минерализации органического вещества под действием азота мочевины.

Таблица 63. Иммобилизация азота мочевины и азота горчицы белой при выращивании озимой пшеницы (Черников и др., 2015]

| Вариант | Иммобилизация азота | |
|--|---------------------|-----------------------|
| | г/м ² | % от применяемой дозы |
| P ₆₀ K ₆₀ – фон | - | - |
| Фон + ¹⁵ Nм | 1,58 | 33 |
| Фон + ¹⁵ Горчица | 3,45 | 58 |
| Фон + ¹⁵ Горчица + + 1/3 Nm | 2,73 | 45 |

От интенсивности и направленности потоков азота в системе почва-растение зависит экологическая устойчивость агрофитоценоза. «Входом» вещества в систему является минерализованный в процессе вегетации растительный азот (М), тогда как «выходом» служит нетто-минерализованный азот (Н•М), а «возвратом на выходе» – реиммобилизованный азот (РИ). Устойчивость системы обеспечивается возвратом 50% вещества, при котором она приближается к состоянию гомеостаза (экологического равновесия) [Одум, 1986]. Интегральным показателем устойчивого функционирования агрофитоценоза служит отношение Н•М:РИ, характеризующее соотношение между потоками азота, направленными в гетеро- и автотрофный циклы. Чем выше значение отношения Н•М:РИ, тем менее устойчива система. В то же время чем ниже значение другого показателя РИ:М (циркуляция азота), тем менее устойчива система.

В условиях чернозема типичного (Белгородская обл.) азота минерализовалось больше, а реиммобилизовалось меньше при совместном внесении биомассы горчицы и мочевины (табл. 64).

Таблица 64. Показатели интегральной оценки функционирования агрофитоценоза при внесении биомассы горчицы, меченой ^{15}N

| Показатель | Вариант | |
|---|--|---|
| | $\text{P}_{60}\text{K}_{60} + ^{15}\text{Горчица}$ | $\text{P}_{60}\text{K}_{60} + ^{15}\text{Г} + 1/3 \text{N}_m$ |
| Реиммобилизованный азот N, г/м ² | 2,88 | 2,78 |
| Минерализованный азот N, г/м ² | 6,57 | 7,56 |
| Нетто-минерализованный азот N, г/м ² | 3,12 | 4,14 |
| РИ:М, % | 44 | 37 |
| Н•М:РИ | 1,1 | 1,5 |

По показателям отношений РИ:М и Н•М:РИ агрофитоценозы на черноземе находились в зоне стресса при допустимом уровне воздействия. Однако при внесении одной биомассы горчицы агрофитоценоз находился на более высоком уровне экологической устойчивости, чем при совместном внесении биомассы горчицы и мочевины. Азотные минеральные удобрения несколько снижали устойчивость системы, поскольку возрастала минерализация азота горчицы и азота почвы и снижалась их иммобилизация/реиммобилизация.

3.3. Система основной обработки и азотный режим черноземных почв

Одним из важнейших факторов, влияющих на продуктивность возделываемых культур, является обработка почвы, под действием которой изменяются ее физико-химические свойства, воздушный, водный и питательный режимы. При этом создаются различные условия развития корневой системы растений, перераспределение пожнивно-корневых остатков в пахотном слое [Максютов и др., 2001; Гармашов, 2004; Рымарь, 2007; Власенко и др., 2011; Черкасов и др., 2014].

В то же время длительная обработка черноземов привела к значительной потере гумуса, при этом происходят качественные изменения гумусовых веществ. При обработке почвы на глубину 20-22 см разрушаются лабильные части гуминовых кислот с относительным накоплением компонентов центральной (ядерной) части, а компоненты лабильной части концентрируются в гуминовых кислотах в слое 20-30 см [Черников, Соколов, 2015]. При вспашке на 28-30 см перемещение верхнего, обогащенного азотом слоя в нижний создает более благоприятные условия для его сохранения и накопления в гуминовых кислотах.

При внесении удобрений при поверхностной обработке накапливается максимальное количество NO_3^- в типичном черноземе, тогда как при отвальной обработке они мигрируют по профилю почвы и накапливаются на глубине ниже 60 см [Уваров, 2005]. Установлено также, что максимальное количество минерального азота накапливается при вспашке при совместном применении органических и минеральных удобрений [Уваров, Соловиченко, 2009]. При этом значительная часть его локализуется на глубине 70-100 см. Совместное внесение минеральных и органических удобрений в течение 20 лет способствовало повышению содержания

нитратного и щелочегидролизующего азота в черноземе типичном [Уваров, Карабутов, 2012]. Внесение органических и минеральных удобрений в течение 72 лет обеспечило повышение количества минерального, легко- и трудногидролизующего азота по всему профилю выщелоченного чернозема [Минакова, 2011]. При минимальной обработке снижается обеспеченность растений азотом в начале их вегетации, уменьшаются запасы минерального азота в метровом слое почвы [Акулов, 1992]. При безотвальной обработке внесение минеральных удобрений повышает численность микроорганизмов (бактерий, грибов, актиномицетов) в верхнем слое почвы 0-10 см в 2,8 раза по сравнению с отвальной обработкой и в 1,6 раза по сравнению обычной обработкой почвы. Органические и минеральные удобрения (при совместном применении) способствовали более интенсивному развитию микрофлоры при безотвальной обработке почвы: численность микроорганизмов увеличилась в 1,3 раза по сравнению с отвальной вспашкой.

Длительное (26 лет) применение органических и минеральных удобрений в условиях 5-польного зернопропашного севооборота (чернозем типичный, Белгородская обл.) обеспечивало повышение содержания NO_3^- в метровом слое почвы в 3,2 раза (табл. 65). При этом основное количество минерального азота в начале вегетации озимой пшеницы накапливалось в слоях 0-30 см и 50-100 см [Уваров, Карабутов, 2014]. Наибольшее количество NO_3^- накапливалось при мелкой обработке почвы, минимальное – при вспашке. На содержание легкогидролизующего азота большее влияние оказывали удобрения, чем способы основной обработки. Удобрения оказывали также большее влияние на соотношение углерода к азоту, чем способы обработки почвы, которые не влияли на содержание общего азота в почве.

Нет единого мнения о влиянии систем обработки в зерносвекловичном севообороте на азотный режим почвы. По мнению одних исследователей, для повышения плодородия черноземных почв необходима обработка без оборота пласта [Моргун и др., 1983; Тарарико, 1983; Шикла, Гнатенко, 1991]. Накопление органических остатков и удобрений в верхних слоях почвы способствует почвообразовательному процессу, близкому к природному. По мнению других исследователей, повышение плодородия верхних слоев и снижение его нижних слоев неприемлемо для сахарной свеклы [Никифорова, 1989; Ивойлов, 1991; Гулидова, 2000; Кураков и др., 2003; Никольников, Боронтов, 2003, 2005]. По мнению одних исследователей, при мелкой заделке органических удобрений происходит интенсивное разложение органических веществ с использованием почвенного минерального азота [Азаров и др., 2003]. По мнению других – замена глубокой вспашки на плоскорезную позволяет ослабить темпы минерализации гумуса [Власенко и др., 2001; Шабаев, 2003; Азизов, 2005].

Плоскорезная обработка обеспечивала повышенное содержание нитратного азота перед посевом сахарной свеклы при внесении навоза в пару и под сахарную свёклу как в пахотном, так и в подпахотном слоях чернозема выщелоченного (Воронежская обл.) (табл. 66).

Таблица 65. Влияние способа обработки и удобрений на содержание нитратного азота в почве под посевом озимой пшеницы, мг/кг (по завершении 4-й ротации севооборота) [Уваров, Карабутов, 2014]

| Доза удобрений на 1 га севооборотной площади | | Слой почвы, см | Способ обработки почвы | | | | | |
|--|--|----------------|------------------------|------|------------------------|------|------------------|------|
| | | | вспашка | | безотвальная обработка | | мелкая обработка | |
| Навоз, т | Минеральные | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 0 | Без удобрений | 0-30 | 8,0 | 7,1 | 7,5 | 6,8 | 7,1 | 6,5 |
| | | 30-50 | 6,0 | 3,6 | 5,7 | 5,1 | 5,4 | 4,0 |
| | | 50-100 | 6,8 | 2,7 | 6,5 | 3,9 | 5,7 | 2,7 |
| | | 0-100 | 7,0 | 4,5 | 5,3 | 6,3 | 6,1 | 4,4 |
| | N ₆₀ P ₆₂ K ₆₂ | 0-30 | 11,4 | 10,5 | 10,7 | 9,0 | 12,4 | 11,3 |
| | | 30-50 | 6,7 | 5,1 | 7,2 | 7,6 | 6,6 | 9,3 |
| | | 50-100 | 11,3 | 4,4 | 10,0 | 11,3 | 9,1 | 10,2 |
| | | 0-100 | 10,4 | 6,7 | 9,7 | 9,3 | 9,6 | 10,3 |
| | N ₁₂₀ P ₁₂₄ K ₁₂₄ | 0-30 | 13,2 | 19,5 | 12,4 | 12,6 | 12,0 | 12,9 |
| | | 30-50 | 8,8 | 6,3 | 8,5 | 7,6 | 8,0 | 10,2 |
| | | 50-100 | 16,2 | 5,2 | 16,9 | 15,1 | 14,3 | 11,7 |
| | | 0-100 | 13,8 | 10,3 | 13,9 | 11,8 | 13,4 | 13,2 |
| 8 | Без удобрений | 0-30 | 9,0 | 7,6 | 8,4 | 8,9 | 8,7 | 9,3 |
| | | 30-50 | 6,6 | 3,1 | 6,8 | 5,3 | 6,9 | 7,1 |
| | | 50-100 | 7,5 | 2,8 | 7,4 | 4,2 | 6,8 | 3,2 |
| | | 0-100 | 7,8 | 4,5 | 7,6 | 6,1 | 7,4 | 7,5 |
| | N ₆₀ P ₆₂ K ₆₂ | 0-30 | 11,4 | 11,0 | 10,9 | 11,2 | 12,5 | 11,2 |
| | | 30-50 | 8,9 | 5,5 | 8,6 | 6,3 | 8,0 | 8,9 |
| | | 50-100 | 13,9 | 7,6 | 12,5 | 7,8 | 9,3 | 10,1 |
| | | 0-100 | 12,2 | 8,0 | 11,2 | 8,4 | 9,4 | 10,0 |
| | N ₁₂₀ P ₁₂₄ K ₁₂₄ | 0-30 | 17,9 | 18,6 | 16,3 | 13,9 | 18,6 | 17,2 |
| | | 30-50 | 11,9 | 13,9 | 10,8 | 12,1 | 9,6 | 14,0 |
| | | 50-100 | 14,4 | 10,7 | 13,0 | 13,5 | 12,3 | 14,0 |
| | | 0-100 | 15,0 | 14,4 | 13,6 | 13,2 | 13,7 | 15,0 |
| 16 | Без удобрений | 0-30 | 9,0 | 10,7 | 9,3 | 8,9 | 9,8 | 11,2 |
| | | 30-50 | 7,4 | 7,8 | 8,6 | 5,3 | 7,9 | 6,5 |
| | | 50-100 | 8,6 | 4,9 | 8,2 | 4,2 | 8,6 | 4,0 |
| | | 0-100 | 8,5 | 7,8 | 8,7 | 6,1 | 8,8 | 7,2 |
| | N ₆₀ P ₆₂ K ₆₂ | 0-30 | 16,8 | 17,7 | 15,3 | 14,4 | 17,5 | 17,0 |
| | | 30-50 | 13,6 | 12,6 | 12,3 | 8,9 | 11,5 | 10,9 |
| | | 50-100 | 15,6 | 6,8 | 14,5 | 10,3 | 13,0 | 10,1 |
| | | 0-100 | 15,6 | 12,3 | 14,3 | 11,2 | 14,1 | 12,6 |
| | N ₁₂₀ P ₁₂₄ K ₁₂₄ | 0-30 | 22,7 | 28,2 | 21,8 | 22,9 | 23,3 | 18,6 |
| | | 30-50 | 13,8 | 19,1 | 14,1 | 19,3 | 13,3 | 15,2 |
| | | 50-100 | 17,9 | 12,3 | 16,5 | 17,0 | 14,3 | 13,3 |
| | | 0-100 | 18,5 | 19,7 | 17,6 | 19,7 | 16,8 | 15,7 |

В графе 1 – в начале вегетации, 2 – перед уборкой.

Таблица 66. Динамика содержания нитратного азота в почве посевов сахарной свеклы в зависимости от системы обработки почвы и удобрений, мг/кг [Никульников, Бортнов, 2005]

| Система обработки почвы | Удобрение | Всходы | | Середина вегетации | | Уборка | |
|---------------------------|---|---------|----------|--------------------|----------|---------|----------|
| | | 0-30 см | 30-50 см | 0-30 см | 30-50 см | 0-30 см | 30-50 см |
| Отвальная вспашка | Без удобрений | 16 | 11 | 8 | 5 | 2 | 2 |
| | $H_{50} + N_{160} P_{180} K_{168}$ | 24 | 21 | 10 | 10 | 3 | 2 |
| | $H_{50} + H_{50} + N_{160} P_{170} K_{160}$ | 27 | 24 | 11 | 9 | 3 | 2 |
| Плоскорезная обработка | Без удобрений | 19 | 12 | 15 | 11 | 5 | 4 |
| | $H_{50} + N_{160} P_{180} K_{168}$ | 27 | 17 | 18 | 20 | 4 | 5 |
| | $H_{50} + H_{50} + N_{160} P_{170} K_{160}$ | 33 | 17 | 17 | 9 | 3 | 2 |
| Комбинированная обработка | Без удобрений | 14 | 12 | 12 | 5 | 4 | 4 |
| | $H_{50} + N_{160} P_{180} K_{168}$ | 17 | 12 | 7 | 7 | 4 | 3 |
| | $H_{50} + H_{50} + N_{160} P_{170} K_{160}$ | 18 | 15 | 9 | 7 | 3 | 3 |

* H_{50} – навоз 50 т/га.

Внесение удобрений в паровом поле увеличивает содержание N- NO_3^- на 46-51%, а в клеверном звене – на 31-45%. В процессе вегетации свеклы количество нитратов снижалось и тем сильнее, чем выше дозы удобрений применялись. Это происходило вследствие потребления азота растениями и газообразных его потерь.

Потребление азота свеклой повышается при внесении органических удобрений (по 50 т/га в черном пару и под свеклу) и минеральных удобрений (табл. 67). Свекла потребляла больше азота в звене клевер-пшеница по сравнению с черным паром-пшеница.

Таблица 67. Потребление и расход азота на формирование 1 т корнеплодов сахарной свеклой в зависимости от системы обработки почвы и удобрения [Никульников, Боронтов, 2015]

| Система обработки почвы | Удобрения | Вынос азота, кг/га | | Расход азота, кг/т | |
|---------------------------|---|--------------------|-----|--------------------|-----|
| | | 1 * | 2 | 1 | 2 |
| Отвальная вспашка | Без удобрений | 104 | 133 | 4,0 | 5,8 |
| | $N_{50} + N_{160} P_{180} K_{160}$ | 172 | 191 | 4,7 | 5,6 |
| | $H_{50} + H_{50} + N_{160} P_{170} K_{160}$ | 187 | 207 | 5,1 | 5,9 |
| Плоскорезная обработка | Без удобрений | 111 | 113 | 4,5 | 5,5 |
| | $N_{50} + N_{160} P_{180} K_{160}$ | 178 | 195 | 5,1 | 6,1 |
| | $H_{50} + H_{50} + N_{160} P_{170} K_{160}$ | 170 | 181 | 5,0 | 5,7 |
| Комбинированная обработка | Без удобрений | 116 | 114 | 4,4 | 5,0 |
| | $N_{50} + N_{160} P_{180} K_{160}$ | 197 | 207 | 5,4 | 5,9 |
| | $H_{50} + H_{50} + N_{160} P_{170} K_{160}$ | 198 | 215 | 5,4 | 5,9 |

* 1 – звено черный пар-озимые-свекла; 2 – звено клевер 1 г.п. озимые-свекла.

Комбинированная обработка обеспечивала максимальное потребление азота свеклой и его расходов на формировании 1 т корнеплодов. Комби-

нированная система основной обработки почвы в севообороте в сочетании с органическими и минеральными удобрениями улучшала азотный режим чернозема выщелоченного и обеспечивала сохранение гумуса в почве.

Альтернативой традиционной системе обработки почвы (ТО) является технология прямого посева (NO-Till, NT). Экологические преимущества выражаются в снижении техногенного пресса на почву, что дает возможность запустить механизм самовосстановления ее плодородия и саморегуляции биоценологических связей и максимально приблизить агрофитоценозы к естественным сообществам [Власенко, Садохина, 2010; Власенко и др., 2001, 2011]. Система NT отличается от ТО уменьшением числа обработок и оставлением пожнивно-корневых остатков на поверхности почвы. Растительные остатки способствуют снижению перепаду температур в почве. Почва, покрытая растительными остатками, будет прохладнее весной и летом и теплее осенью и зимой [Беляева, 2013]. Оставленные мульча и стерня снижают испарение воды и способствуют сохранению влаги в почве. Созданный при NT микроклимат на поверхности почвы менее благоприятен для разложения растительных остатков, чем в самой почве. В результате замедляется разложение биомассы остатков и высвобождение азотсодержащих веществ, т.е. снижается их доступность растениям [Carefoot et al., 1990; Nyborg et al., 1995]. Вспашка почвы стимулирует разложение растительных остатков, активность микрофлоры, мобилизации доступных форм азота (табл. 68). При традиционной системе обработки чернозема в слое 0-30 см накапливалось большее количество нитратного и азота (без внесения удобрений и оставления соломы) по сравнению с NT [Nybor, Malhi, 1989; Nyborg et al., 1995]. При этом накопление аммонийного азота в почве не зависело от системы обработки.

При нулевой обработке возрастают потери азота (вследствие улетучивания NH_3) при внесении таких форм азотных удобрений, как мочевина, безводный аммиак, карбамид и аммиакааты.

Таблица 68. Содержание нитратного и аммонийного азота в слое чернозема 0-30 см при различных системах обработки почвы, кг N/га [Nybor, Malhi, 1989]

| Месяц | No-Till | | Традиционная обработка | |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| | N- NO_3^- | N- NH_4^- | N- NO_3^- | N- NH_4^- |
| Август | 28 | 8 | 40 | 8 |
| Ноябрь | 57 | 2 | 85 | 1 |
| Май | 75 | 2 | 111 | 1 |
| Август | 7 | 6 | 7 | 4 |

Поэтому при использовании системы NT поверхностное внесение удобрений, содержащих NO_3^- , может быть более эффективным по сравнению с мочевиной [Malhi et al., 1996].

При безотвальной обработке и глубоком рыхлении чернозема обыкновенного (Краснодарский край) содержание минерального азота возрастало к середине вегетации сахарной свеклы (табл. 69). Максимальное количество минерального азота в почве на протяжении всего периода вегетации расте-

ний содержалось при отвальной обработке. При минимальной обработке содержание минерального азота снижалось от посева до уборки урожая.

Таблица 69. Содержание минерального азота в пахотном слое чернозема обыкновенного в зависимости от способа обработки почв, мг/кг [Коробской, 1995]

| Обработка | Периоды развития свеклы | | |
|---------------|-------------------------|---------------------|--------|
| | посев | смыкание междурядий | уборка |
| Отвальная | 4,1 | 4,2 | 3,5 |
| Безотвальная | 3,8 | 5,3 | 1,8 |
| Поверхностная | 5,9 | 4,0 | 1,7 |

Использование удобрений, меченных ^{15}N , показало, что при традиционной обработке почвы растения лучше использовали азот мочевины на 27% и сульфата аммония на 28%, чем при NT. При этом традиционная обработка снижала газообразные потери азота [Volk, 1959].

Система обработки почвы существенно влияет на размер иммобилизации азота удобрений. При внесении низких доз мочевины (33 кг N/га) ячмень использовал меньше азота при NT, чем при TO [Nybor, Malhi, 1989]. Однако при внесении высоких доз азота (100 кг N/га) растения использовали одинаковое его количество при обеих системах обработки [Шарков, 2009; Чуян и др., 2011]. Таким образом, иммобилизационный эффект, вызванный растительными остатками, перекрывался высокой дозой азота, что обеспечивает формирование одинакового урожая зерна.

В настоящее время представления об оптимальном применении азотных удобрений далеки от идеального и нуждаются в дополнительных исследованиях при использовании различных систем обработки почвы, включая минимальную. Поскольку потребности культур в азоте удовлетворяются за счет почвенных резервов и азота удобрений, условия, при которых это происходит, требуют пересмотра с учетом тех изменений, которые приносят применяемые системы обработки почв. Рассмотрим этот вопрос при использовании системы no-till (NT) и традиционной обработки (TO) почвы. Снижение интенсивности обработки почв и оставление пожнивных остатков предшествующей культуры на поверхности почвы, создаваемый мульчирующий слой приводят к снижению перепадов внутрипочвенных температур [Doran, 1987]. Почва, покрытая толстым слоем растительных остатков, будет прохладнее весной и летом [Carefoot et al., 1990; Cox et al., 1990], но теплее в течение осенне-зимнего сезона [Gauer et al., 1982]. Мульча и оставленная стерня, сохраняемая в NT, уменьшает испарение и задерживает больше снега, что не только обеспечивает лучшую инсоляцию в холодное время года, но и может повысить содержание влаги в почве, которые обычно выше в NT по сравнению с TO [Carefoot et al., 1990; Lafond, 1992].

В Швейцарии при изучении динамики азота в суглинистой почве в пропашном севообороте при нулевой обработке и отвальной вспашке почвы [Zihlmann et al., 2006] при внесении одинаковых доз (по 2/3 от рекомендованных) установлено, что при близких значениях суммарной минерализации азота при нулевой обработке почвы минерализация азота протекала

равномернее и дольше, чем при вспашке. При этом количество минерализованного азота варьировало по годам в зависимости от погодных условий и вида культуры. Рекомендовано при переходе к нулевой обработке уменьшать дозы азотных удобрений под озимые зерновые.

Мульча и пожнивные остатки на поверхности почвы могут непосредственно влиять на цикл азота, потому что контакт между остатками растений и почвенными микроорганизмами снижен, а микроклимат на почвенной поверхности менее благоприятен для разложения по сравнению с внутрипочвенным и, следовательно, растительные остатки будут разлагаться более медленно. Это означает, что питательные вещества, входящие в их состав, будут высвобождаться также медленнее, что уменьшит количество $N_{\text{мин.}}$, доступного растениям в текущем сезоне. Распад органического вещества, уже находящегося в почве, может быть замедлен из-за пониженных температур под мульчирующим слоем [Carefoot et al., 1990]. Кроме того, отсутствие стимуляции активности почвенных микроорганизмов за счет обработки почвы приводит к большей минерализации соединений углерода и азота. Известно, что повышение температура почвы на 1 °C интенсифицирует процесс минерализации примерно на 10% [Шарков, 1999].

Считается, что органическое вещество почвы часто заключено в макроагрегатах, где оно защищено от декомпозиции. Механическая обработка ведет к разрушению почвенных агрегатов и обнажению защищенного органического вещества, тем самым делая его доступным микроорганизмам и стимулируя его разложение [Dogan et al., 1987]. Также следует учитывать, при традиционной обработке происходит лучшее снабжение почвенных микроорганизмов воздухом, что также является активизирующим фактором. Данное предположение подтверждается исследованиями [Neborg, 1989] по влиянию поверхностных пожнивных остатков на динамику содержания в почве $N-NO_3$ и $N-NH_4$. Образцы почв, отбираемые в течение двух лет на делянках без применения удобрений, содержали большее количество $N-NO_3$ при применении традиционной обработки по сравнению с no-till, что отражает большую минерализацию и, соответственно, меньшую иммобилизацию, индуцированную вспашкой, причем солома оставалась в обоих случаях.

Известно, что $N-NO_3$ может быть легко потерян в результате денитрификации и вымывания, причем максимальная миграция нитратов наблюдается при их высоких концентрациях [Никитишен, 1980]. Поэтому, низкая минерализация может уменьшить потери $N-NO_3$ и привести к накоплению почвенного N через повышение накопления органического вещества. Обозначенное уменьшение, наряду с увеличением урожайности при применении no-till, отмечаемое в ряде случаев, может привести к азотному дефициту при использовании этой системы, так как снижение общей минерализации окажет влияние на количество $N_{\text{мин.}}$, доступного для растений.

В течение летнего периода эмиссия была примерно одинаковой в обеих системах обработки, но значительно понижалась в NT в весенний период [Lemake et al., 1989]. Суммарная эмиссия N_2O была равна или ниже в NT по сравнению с TO [Malhi, 1990]. Это показывает, что система NT имеет потенциал уменьшить потери азота, происходящие в этом случае.

Поверхностное внесение азотных удобрений имеет тенденцию быть использовано растениями менее эффективно в системе без вспашки [Malhi, 1996]. Это связано с тем, что удобрения остаются на поверхности до того момента, пока они не перейдут в растворимую форму. Тогда как в традиционной системе земледелия поверхностно внесенные питательные вещества будут заделаны в почву последующей вспашкой. Заделка в почву уменьшает потери азота, которые могут происходить в результате улетучивания [Fenn et al., 1981; Mengel et al., 1982]., поэтому необходимо тщательно подходить к выбору формы удобрения в целях снижения таких потерь. Например, такое удобрение как мочевина разлагается в почве до NH_3 под действием фермента уреазы, содержание которой значительно увеличивается в верхнем слое минимальной обработки, что приводит к потерям аммиака в атмосферу, особенно в условиях, когда удобрение расположено близко к почвенной поверхности [Hargrove et al., 1977; Terman, 1979].

Улетучивание N из мочевины оставляет меньшее его количество для растений, и, как следствие, большие его дозы могут понадобиться по сравнению с другими видами удобрений [Volk, 1996]. Повышение pH почвы, содержание карбонатов или увеличение дозы вносимой мочевины ведут к увеличению концентрации NH_3 в почвах и, следовательно к большему его улетучиванию. Потери аммиака зависят от гранулометрического состава и будут выше на почвах песчаных и каменистых. Потери могут быть выше, если мочевина вносится на почвах, покрытых мульчирующим слоем растительных остатков, так как гидролиз этого соединения на мульче может повысить его потери в результате улетучивания, по сравнению с ситуацией, когда это удобрение находится в почве. Следовательно, нулевая обработка почв может увеличивать потери N из таких удобрений, как безводный аммиак, карбамид и аммиакаты. Это связано с повышенной уреазной активностью и наличием мульчирующего слоя из растительных остатков на поверхности почвы [Mc Inness et al., 1986].

Нитратный азот удобрений подвержен значительно меньше улетучиванию, но в то же время ион NO_3^- более подвижен в почвах по сравнению с NH_4^+ , и следовательно даже поверхностно внесенные NO_3^- содержащих удобрений могут передвигаться вниз по профилю к корневой зоне достаточно быстро, что может быть особенно важно для обеспечения растений элементами питания в раннем сезоне вегетации. В связи с вышесказанным, поверхностное внесение NO_3^- содержащих азотных удобрений может быть относительно более эффективно, чем мочевины или NH_4^+ содержащих удобрений при использовании no-till в сравнении с традиционной системой обработки. В опытах, проведенных в Канаде [Malhi et al., 1996], зарегистрирован более низкий коэффициент перехода ^{15}N в почву и растения из удобрений при внесении мочевины и сульфата аммония, по сравнению с KNO_3 в обеих системах обработки, традиционной и нулевой, но разница была более заметной в последней. Так, использование ^{15}N в растениях из мочевины было почти вдвое меньше по сравнению с KNO_3 . На серых почвах коэффициент усвоения ^{15}N был на 16% больше для мочевины и 11% больше для сульфата аммония в системе традиционной обработки по сравнению с no-till. Эта разница на черноземах была более заметной и составила

27% для мочевины и 28% для сульфата аммония соответственно для упомянутых обработок. Разница в потерях ^{15}N между поверхностным внесением удобрений (нулевая обработка) и заделкой их в почву (обработка со вспашкой) отражает газообразные потери аммиака в системе no-till, так как только маленький процент аммиака улетучивается, когда удобрения заделываются в почву [Volk, 1959].

Известно, что заделка пожнивных остатков в почву приводит к увеличению потерь, происходящих в результате иммобилизации, особенно в присутствии растительных остатков с высоким C:N соотношением [Верниченко и др., 1980; Панников и др. 1984]. Обработка почв может увеличить потери в результате иммобилизации в случае совместной заделки удобрений и пожнивных остатков и разложения последних, особенно в случае наличия тесного контакта между ними. В системе no-till пожнивные остатки в почву не заделываются и остаются на поверхности. Тем не менее это приводит к потерям, так как наличие достаточной влажности может также инициировать активное их разложение, что также приведёт к потерям азота в результате иммобилизации при разбросном способе внесения удобрений, так как разлагающиеся остатки находятся в тесном контакте с высокой концентрацией доступного азота удобрений, внесенных таким способом.

Ассимиляция азота органических удобрений микроорганизмами на no-till наблюдалась еще в ранних опытах [Rowel, 1977]. Потери азота, которые происходят в результате иммобилизации, могут привести к снижению урожая зерна и более заметному отклику культур на внесение азотных удобрений в no-till. В исследованиях, проведенных [Neborg et al., 1989], нитрат аммония был внесен поверхностно в системе NT, а в системе TO – поверхностно с последующей заделкой в почву, в результате урожайность зерна ячменя была выше на TO по сравнению с NT (при оставлении пожнивных остатков в обоих случаях), но отличия были не значительны, когда остатки были удалены, что указывает на интенсификацию потерь в результате иммобилизации при NT с присутствием соломы. В четырехлетнем опыте было изучено влияние мочевины, внесенной в ленты, на урожайность ячменя при различных способах обработки [Neborg et al., 1989]. Как показали исследования, урожайность и коэффициент использования N растениями ячменя были меньше при NT, чем при TO при внесении низких доз N, но при высоких дозах внесения урожайность была выше или такой же в системе NT, как и при традиционной обработке. Соответственно, урожайность и усвоение N ячменем были ниже с оставлением соломы по сравнению с вариантом без соломы при внесении низких доз азота, но при внесении высоких доз азота (100 кг/га), даже в вариантах с оставлением соломы, величины изучаемых параметров не отличались между собой. Эта тенденция снижения урожайности и усвоения N была более очевидной при низких дозах внесения (0 или 33 кг/га). С одной стороны, это может быть объяснено медленным высвобождением минерального азота в почве в системе NT [Blevins et al., 1987; Locke et al., 1987; Phillips et al., 1980]. С другой стороны, снижение урожайности и использования N в вариантах с оставлением соломы и низкими дозами внесения азота, возможно, может быть

объяснено иммобилизацией внесенного азота. Иммобилизационный эффект, вызванный оставлением растительных остатков, был перекрыт при внесении азота в высоких дозах в обеих обработках (с оставлением соломы и без нее), что обусловило равноценные урожайность и коэффициент использования растениями N. Положительное влияние так называемой антидепрессивной добавки (добавления компенсирующей дозы азота минеральных удобрений) были отмечены и другими учеными [Назарюк и др., 2010; Чуян и др., 2011].

Следовательно, при поверхностно-разбросном внесении азота более высокие его дозы могут быть необходимы для компенсации иммобилизационных потерь в NT по сравнению с TO, особенно в присутствии растительных остатков с высоким C:N отношением. Когда дозы N относительно велики, даже при условии оставления пожнивных остатков возможно получение таких же или даже более высоких результатов по сравнению с СТ.

С течением времени возвращение растительных остатков может привести к увеличению способности почв поставлять азот. В такой системе иммобилизация в свежих внесенных остатках может быть сбалансирована минерализацией почвенного органического вещества. К примеру, в исследованиях, проведенных в Канаде [Neborg et al., 1995], урожайность зерна на делянках, удобренных азотом в системе TO с удалением соломы, была значительно выше в начале эксперимента, чем на делянках с ее оставлением. Тем не менее с течением времени разница в урожаях между NT и TO исчезла, и солома, возвращаемая в TO, не вызывала его снижения после 6 лет на почвах с низким содержанием органического вещества и после 2 лет на почвах с высоким его содержанием. В связи с этим авторы пришли к выводу, что почвенная экосистема может адаптироваться к оставлению пожнивных остатков NT в течение нескольких лет. Можно ожидать снижения количества азота, доступного растениям, и в свою очередь падения урожая в системе no-till в течение первых лет ее применения. Возможно, повышение доз N-удобрений необходимо, чтобы минимизировать этот эффект на начальных этапах применения NT обработки, пока цикл превращения питательных веществ в почве не стабилизируется.

Таким образом, использование различных систем обработки требует оценки их влияния на динамику содержания азота в почве, что может сказываться на продуктивности севооборота и соответственно на пересмотре представлений о применении азотных удобрений. Эффективность их использования, так же как и трансформация этого элемента в почве и его доступность растениям, может меняться при использовании различных систем обработки в результате изменения микроклимата, микробиологической активности и местоположения удобрений относительно оставляемых пожнивных остатков. Повышенные дозы азотных удобрений могут быть необходимы в течение первых лет применения no-till технологии. Синхронизация нужд культур в этом элементе и его доступность может быть достигнута путем оптимизации доз, вида удобрения, его места и времени внесения соответственно почвенно-климатическим условиям, а также задачам и условиям конкретного пользователя.

3.4. Влияние растительных остатков (и соломы) на азотный режим черноземных почв

Основная функция растительных остатков и соломы состоит в регуляции потоков углерода и азота в составе почва-растение с агрономическими и экологическими эффектами. Отличительной чертой современной системы земледелия является биологизация агротехнологий, оптимизация почвенного плодородия органическими средствами и повышение устойчивости агроэкосистем. Использование растительных остатков и соломы, увеличение доли сидеральных посевов и многолетних трав в структуре севооборотов – основное направление развития растениеводства в стране. Растительные остатки обладают полифункциональными свойствами, оказывая действие на биологические, химические и физиологические свойства почвы. Растительные остатки являются важнейшим источником элементов питания, растворимых органических соединений и сложных органических веществ в почве, регулируя пищевой (в том числе азотный), воздушный и тепловой режимы. Растительные остатки служат энергетической основой функционирования микробиоценозов, осуществляющих минерализацию и иммобилизацию соединений азота. Трансформация углерода и азота тесно связана с биохимическим составом биомассы остатков, с изменением гидротермических и физико-химических свойств почвы [Левин, 1977; Емцев, Ницше, 1980; Лыков, 1982; Семенов и др., 2002, 2006].

Количество растительных остатков зависит от вида выращиваемой культуры, почвенно-климатических условий, плодородия почвы, агротехнологий выращивания и уборки урожая (табл. 70). Максимальное количество растительных остатков (250-300 ц/га) образуется при выращивании многолетних трав, минимальное (8-10 ц/га) – при выращивании нута, чины, сои, вики и бобов [Завалин и др., 2007; Завалин, 2015; Завалин, Соколов, 2016]. В условиях дерново-подзолистых почв наибольшее количество азота в ПКО накапливалось при выращивании гороха, клевера, озимой ржи, овса, многолетних злаковых трав и льна по сравнению с черноземами. Все остальные культуры накапливают азот в ПКО больше при их выращивании на черноземных почвах [Левин, 1977, 1981; Заболоцкая, Антеева, 1974; Гаркиял, 1974; Полеско и др., 1974; Юркин, Пименов, 1977; Черепанов, 1979; Антонив, 1981; Кизяков, 1981; Стулин, 1981, 2007; Яговенко и др., 2003; Лебедева, 2006].

Максимальное количество азота накапливается в растительных остатках многолетних бобовых трав (люцерна, клевер). По количеству азота в растительных остатках сельскохозяйственные культуры можно расположить в следующий ряд: многолетние бобовые травы > кукуруза з/м > озимая пшеница > кукуруза (зерно) > озимая рожь > ячмень > сахарная свекла > горох, гречиха, овес > просо > подсолнечник > картофель > яровая пшеница > лен (табл. 70).

Таблица 70. Накопление азота в пожнивно-корневых остатках сельскохозяйственных культур

| Культура | Биомасса ПКО, ц/га | | Количество азота, кг/га | |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| | дерново-подзолистые почвы | черноземные почвы | дерново-подзолистые почвы | черноземные почвы |
| Вика-овес | 22-46 | 25-53 | 22-27 | 23-40 |
| Горох | 14-26 | 11-12 | 19-32 | 17-26 |
| Гречиха | 11-27 | 20-41 | 4-22 | 16-34 |
| Картофель | 20-41 | 19-30 | 6-24 | 10-18 |
| Кукуруза, зерно | 21-30 | 23-46 | 18-26 | 20-40 |
| Кукуруза, з/м | 27-33 | 24-57 | 27-36 | 24-62 |
| Клевер 1 г.п. | 20-91 | 26-73 | 38-178 | 49-143 |
| Лен | 16-27 | - | 11-19 | - |
| Люцерна 1 г.п. | 32-61 | 75-91 | 50-139 | 150-207 |
| Многолетние бобово-злаковые травы | 26-91 | 57-83 | 38-103 | 84-94 |
| Многолетние злаковые травы | 28-43 | 21-37 | 20-40 | 18-34 |
| Овес | 18-41 | 15-37 | 13-34 | 11-31 |
| Озимая рожь | 22-51 | 25-57 | 15-35 | 17-39 |
| Озимая пшеница | 24-45 | 40-52 | 27-38 | 30-50 |
| Подсолнечник | 22-53 | 22-61 | 9-23 | 11-28 |
| Просо | 16-40 | 19-45 | 12-30 | 14-34 |
| Сахарная свекла | 10-23 | 12-34 | 11-24 | 13-35 |
| Яровая пшеница | 20-37 | 20-47 | 10-19 | 10-24 |
| Ячмень | 20-44 | 24-57 | 18-33 | 22-39 |

Количество растительных остатков определяет степень их влияния на плодородие почвы. При разложении растительных остатков зачастую возникает дефицит связанного азота несмотря на то, что в почве достаточно большое количество азотфиксирующих бактерий. Дело в том, что в разложении растительных остатков «основную работу» выполняют грибы, которые не фиксируют азот. В свою очередь качество остатков определяется их составом. Содержание азота в остатках колеблется в пределах 0,2-4,2%, углерода – 26-45%. По соотношению углерода к азоту и лигнина к азоту послеуборочные остатки подразделяются на быстро, умеренно и медленно разлагаемые.

Основная роль, определяющая качество растительных остатков, принадлежит азоту. В то же время рост и развитие гетеротрофной микрофлоры зависит от содержания азота в остатках и запасов минерального азота в почве. Растительные остатки делят на две группы: бедные азотом, содержащие его меньше 1% и богатые азотом, в которых содержится больше 2% азота [Станков, 1964].

Установлено, что в черноземе типичном (Воронежская обл.) скорость разложения зависит от вида остатков (табл. 71).

Таблица 71. Скорость разложения в черноземе типичном растительных остатков сельскохозяйственных культур [Дедов и др., 2016]

| Вариант (культура, смесь культур) | Доля разложившихся растительных остатков, % от исходного | | |
|---|--|---------|---------|
| | 2013 г. | 2014 г. | 2015 г. |
| 1. Солома ячменя (Ся) | 26 | 79 | 84 |
| 2. Ся + горчица сарептская пожнивно (ГСп) | 38 | 80 | 98 |
| 3. Ся + редька масленичная пожнивно (РМп) | 41 | 79 | 99 |
| 4. Солома озимой пшеницы (Соз) | 25 | 72 | 87 |
| 5. Соз + люцерна 3-го года жизни (Лз) | 54 | 77 | 92 |
| 6. Соз + ЛЗ + ГСп | 63 | 79 | 96 |
| 7. Соз + донник 2-го года жизни (Д2) | 50 | 71 | 94 |
| 8. Соз + ГСп | 34 | 66 | 89 |
| 9. Люцерна 1-го года жизни (Л1) | 66 | 88 | 98 |
| 10. Люцерна 2-го года жизни (Л2) | 62 | 83 | 93 |
| 11. Люцерна 3-го года жизни (Л3) | 59 | 80 | 93 |
| 12. Донник 1-го года жизни (Д1) | 60 | 80 | 96 |
| 13. Донник 2-го года жизни (Д2) | 59 | 78 | 93 |
| 14. РМп | 85 | 91 | 98 |
| 15. ГСп | 82 | 91 | 97 |
| 16. Стебли + корни подсолнечника (П) | 45 | 73 | 90 |
| 17. П+Л1 | 49 | 83 | 95 |
| 18. П+Д1 | 47 | 76 | 92 |

Наиболее интенсивно в первый год разлагаются растительные остатки редьки масличной (на 85%), горчицы сарептской (на 82%); медленнее – остатки подсолнечника (45%), ячменя (26%), озимой пшеницы (25%). Растительные остатки многолетних бобовых трав разлагались одинаково: люцерны синей (на 59-66%), донника (на 59-60%).

На второй год разложения биомасса остатков ячменя уменьшалась на 53%, озимой пшеницы – на 47%, подсолнечника – на 55%, люцерны – на 21-22%, донника на 1-20%. В течение 3-го года разлагается 6,0-17% биомассы остатков.

Таким, образом, за 3 года в черноземе типичном разложилось следующее количество биомассы растительных остатков: люцерна 1 г.п. и редька масличная (98%), горчица сарептская (97%), донник 1 г.п. (96%), люцерна 2 и 3 г.п. (93%), подсолнечник (90%), солома ячменя (84%).

Растительные остатки смешанных посевов разлагаются быстрее, чем одновидовых: подсолнечник чистый – 90%; подсолнечник с донником 1 г.п. – 92%; подсолнечник с люцерной 1 г.п. – 95%; солома ячменя – 84%, солома ячменя с пожнивными сидератами – 98-99%; солома озимой пшеницы – 87%, солома озимой пшеницы с донником 2 г.п. – 94%, солома озимой пшеницы с люцерной 3 г.п. – 92%. Поэтому для ускорения разложения растительных остатков зерновых культур (на 14-15%) после уборки ячменя целесообразно применение пожнивной сидерации (горчица белая, редька масличная).

При трансформации биомассы растительных остатков в почве создаются три зоны активности микроорганизмов, участвующих в разложении растительного материала [Сычев и др., 2012]. Первая зона представлена непосредственно растительной биомассой. Вторую зону образует смежный слой почвы толщиной 4-7 мм, в котором накапливается азот, образующийся из растительного остатка. Третью зону представляет исходная почва, удаленная от частицы остатка и обладающая микробиологической активностью. Именно в первых двух зонах происходит активная трансформация азотсодержащих соединений остатка.

В процессе разложения растительных остатков происходит не только распад и минерализация сложных органических веществ, но и их синтез. Трансформация остатков характеризуется двухфазной динамикой с интенсивным в начале и медленным в последующем отрезке времени выделением CO_2 . После интенсивного распада органических веществ наступает процесс медленного разложения, связанный с использованием легкодоступных источников питания и накоплением трудногидролизуемых веществ. Продукты разложения (аминокислоты, органические кислоты, сахара) растительных остатков используются грибами и бактериями в течение нескольких часов или суток [Jenkinson, 1977]. Основное количество (75-85%) внесенного органического углерода минерализуется до CO_2 в течение 1-3-х месяцев. Растворимые вещества растительных остатков контролируют быструю стадию разложения, а лигнинсодержащие вещества – медленную [Trinsoutrot et al., 2000]. В процессе разложения растительных остатков создаются условия различного временного и пролонгированного перехода азота в потенциально минерализуемое состояние с «очень быстрым», «умеренно быстрым», «медленным» и «очень медленным» его высвобождением [Семенов и др., 2002].

Растительные остатки (меченные ^{15}N) стимулируют минерализацию органического вещества почвы и в то же время в большей степени иммобилизацию минеральных форм азота. Иммобилизация почвенного азота совпадает по времени с быстрой стадией разложения растительных остатков [Семенов и др., 2002]. Медленная же стадия соответствует нетто-минерализации азота. Разложение незрелой зеленой биомассы овса ($\text{C:N} < 10$), в отличие от зрелой, сопровождается быстрым накоплением минерального азота в почве, при этом процессы минерализации преобладают над иммобилизацией азота.

Введение в севооборот многолетних бобовых трав улучшает баланс азота в земледелии [Прянишников, 1945]. На каждый 1 ц сена бобовых трав приходится 3 кг симбиотического азота; при этом 2 кг азота содержится в самом сене, а 1 кг – в корнях и поукосных остатках в почве.

При длительном применении органических и минеральных удобрений (свыше 70 лет) количество симбиотически фиксированного азота в ПКО колеблется в пределах 10,8-14,2 кг/га (табл. 72). Повышение дозы азота до 90 кг/га на фоне навоза (25 т/га) снижает накопление симбиотического азота на 0,8 кг/га (7%) по сравнению с контролем.

Таблица 72. Количество симбиотически фиксированного азота, поступающего с пожнивно-корневыми остатками, кг/га [Минакова и др., 2016]

| Вариант | Пожнивно-корневые остатки | |
|---|---------------------------|------------------|
| | горох | однолетние травы |
| Контроль (без удобрений) | 11,6 | 50,6 |
| Навоз 25 + N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ | 11,3 | 71,0 |
| Навоз 25 + N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ | 13,5 | 71,8 |
| Навоз 25 + N ₁₃₅ P ₁₃₅ K ₁₃₅ | 11,1 | 73,4 |
| Навоз 50 + N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ | 12,3 | 73,5 |
| Навоз + N ₉₀ P ₄₅ K ₄₅ | 10,8 | 71,0 |
| N ₁₉₀ P ₁₉₀ K ₁₉₀ | 13,2 | 77,6 |
| Навоз 25 + N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀ | 14,2 | 80,7 |

Максимальное количество симбиотического азота в ПКО гороха накапливается при совместном применении навоза и минеральных удобрений (N25 + N₁₅₀P₁₅₀K₁₅₀).

В ПКО однолетних трав (горох/овес) накопление симбиотического азота возрастает в 5,5-5,8 раз по сравнению с ПКО гороха. Усиление азотфиксации в посеве гороха при совместном произрастании с овсом связано, по-видимому, со способностью корневой системы овса использовать труднодоступные формы фосфора в почве [Прянишников, 1945].

На черноземе оподзоленном (Приморский край) при внесении удобрений в ПКО сои накапливалось 45-64 кг N/га (табл. 73).

Таблица 73. Содержание биологического азота в пожнивных и корневых остатках в почве, кг/га [Куликов, 2004]

| Вариант | Опад | Стебли | Корни | Клубеньки | Всего |
|---|------|--------|-------|-----------|-------|
| Без удобрений | 15,2 | 9,0 | 12,4 | 8,5 | 45,0 |
| P ₉₀ | 27,2 | 9,3 | 13,5 | 13,6 | 63,6 |
| N ₆₀ P ₉₀ | 28,7 | 9,9 | 14,6 | 9,7 | 62,9 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ | 28,0 | 12,6 | 13,7 | 8,8 | 63,1 |

Наибольшее количество азота накапливалось в опаде (около 50%) и в клубеньках (20%). Больше симбиотического азота (58 кг N/га) накапливалось в пожнивно-корневых остатках при внесении фосфорных удобрений (90 кг/га), без применения удобрений – только 33 кг N/га.

Использование азота растительных остатков зависит от вида возделываемой культуры (табл. 74). Так, пшеница использовала большее количество азота остатков люцерны (20-28% от внесенного азота) с более узким соотношением C: N=11.

Таблица 74. Использование азота растительных остатков сельскохозяйственными культурами [Dejoux et al., 2000]

| Растительные остатки | C: N | Возделываемая культура | Использование азота растительных остатков, % |
|----------------------|------|------------------------|--|
| Горчица | 28 | Кукуруза | 25 |
| Горох | 16 | Озимый ячмень | 15 |
| Горох | 16 | Озимый ячмень | 23 |
| Люцерна | 15 | Пшеница | 11-17 |
| Люцерна | 11 | Пшеница | 20-28 |
| Пределы колебаний | | | 11-28 |
| Среднее | 20 | | |

В то же время ячмень использовал разное количество меченого ^{15}N азота остатков гороха при одинаковом соотношении C: N=16. В целом, возделываемые культуры используют 11-28% меченого азота растительных остатков.

В условиях выщелоченного чернозема (Новосибирская обл.) салат использовал 7-19% меченого азота остатков капусты [Назарюк, 2002]. При этом морковь использовала 22% азота тех же остатков капусты. За 4 года капуста использовала 28-31% азота растительных остатков овощных культур. В первый год выращивания капуста использовала 12% растительных остатков, тогда как на 4-й год – только 2%.

При внесении растительных остатков усиливаются процессы иммобилизации азота, но из-за усиления активности микроорганизмов растет потребление кислорода, вследствие чего создаются благоприятные условия для развития денитрификации. Газообразные потери азота из внесенных растительных остатков капусты (меченных ^{15}N) при выращивании моркови (чернозем выщелоченный, Новосибирская обл.) доходили до 36% от внесенного количества [Назарюк, 2002].

Использование соломы в качестве удобрения является важным элементом биологизации земледелия. По содержанию органического вещества 1 т соломы равна 3-4 т навоза крупного рогатого скота [Чекмарев, Лукин, 2014]. Положительное действие соломы длится 3-4 года. При выращивании зерновых, зернобобовых и крупяных культур формируется урожай соломы в пределах 2-10 т/га, в которой содержится 0,40-1,40% азота, 0,20-0,60% фосфора, 0,50-2,40% калия и 0,26-2,00% кальция (табл. 75). Для соломы сельскохозяйственных культур характерно широкое соотношение C: N 30-85:1. При поступлении в почву соломы с широким соотношением C: N большим, чем 25-30:1 (солома злаковых культур) возрастает иммобилизация минерального азота в почве и растения могут испытывать недостаток азота, что снижает их продуктивность. Поэтому для оптимизации азотного питания растений к соломе добавляют азотные минеральные удобрения (7-10 кг N/т). При разложении 1 т соломы и ПКО в почве образуется 80 кг органического вещества, 15 кг азота, 8 кг фосфора и 30 кг калия [Тютюнов и др., 2014].

**Таблица 75. Химический состав соломы сельскохозяйственных культур
[Новиков и др., 2007; Лукин и др., 2014]**

| Солома | Сухое вещество, % | Органическое вещество, % | Содержание в воздушно-сухой массе, % | | | | | | | Соотношение C:N (N=1) |
|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------------|------|------|------|------|-----------------------|
| | | | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | CaO | MgO | S | зола | |
| Озимая пшеница | 86 | 81 | 0,50 | 0,20 | 0,90 | 0,28 | 0,11 | 0,43 | 4,86 | 80 |
| Озимая рожь | 86 | 82 | 0,45 | 0,26 | 1,00 | 0,29 | 0,09 | 0,16 | 3,93 | 85 |
| Озимая тритикале | 86 | 82 | 0,40 | 0,20 | 0,90 | 0,30 | 0,10 | 0,15 | 3,90 | 85 |
| Ячмень | 86 | 81 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 0,33 | 0,09 | 0,15 | 4,49 | 80 |
| Овес | 86 | 79 | 0,65 | 0,35 | 1,60 | 0,38 | 0,12 | 0,17 | 6,45 | 60 |
| Яровая пшеница | 86 | 82 | 0,60 | 0,20 | 0,75 | 0,26 | 0,09 | 0,05 | 3,48 | 65 |
| Кукуруза | 86 | 81 | 0,75 | 0,30 | 1,64 | 0,49 | 0,26 | 0,15 | 4,37 | 50 |
| Рапс | 85 | 80 | 0,70 | 0,25 | 1,00 | 2,00 | 0,21 | 0,30 | 4,77 | 55 |
| Гречиха | 86 | 80 | 0,80 | 0,60 | 2,40 | 0,95 | 0,19 | 0,13 | 5,25 | 50 |
| Горох | 86 | 81 | 1,40 | 0,35 | 0,50 | 1,82 | 0,27 | 0,32 | 3,91 | 30 |
| Люпин | 86 | 81 | 1,00 | 0,25 | 1,75 | 0,97 | 0,34 | 0,40 | 4,06 | 40 |
| Соя | 86 | 82 | 1,20 | 0,30 | 0,50 | 1,46 | 0,50 | 0,33 | 3,23 | 30 |
| Вика | 86 | 81 | 1,40 | 0,27 | 0,65 | 0,56 | 0,37 | 0,50 | 4,43 | 30 |

Источники органического вещества значительно различаются по биохимическому составу (табл. 76). Наибольшее количество легкоразлагаемых компонентов содержится в биомассе редьки масличной и соломе гороха, меньше – в соломе озимых и яровых зерновых, еще меньше – в остатках кукурузы. Солома зерновых культур характеризуется высоким содержанием БЭВ (73-81%), низким – белков и широким отношением C:N (55-114) [Лебедева и др., 2006].

Таблица 76. Биохимический состав поступившего в почву органического вещества, % на сухое вещество [Лебедева и др., 2006]

| Культура | Сырой белок | Гемипцел-люлоза | Целлюлоза | Лигнин | C | N | C/N |
|-----------------|-------------|-----------------|-----------|--------|----|------|-----|
| Озимая пшеница | | | | | | | |
| солома | 2,1 | 24 | 40 | 16 | 42 | 0,37 | 114 |
| корни | 2,7 | 21 | 29 | 18 | 41 | 0,47 | 87 |
| Горох | | | | | | | |
| солома | 9,0 | 17 | 25 | 10 | 38 | 1,44 | 26 |
| корни | 7,7 | 19 | 29 | 12 | 40 | 1,23 | 32 |
| Кукуруза | | | | | | | |
| солома | 5,8 | 20 | 33 | 16 | 41 | 1,02 | 41 |
| корни | 7,1 | 23 | 30 | 15 | 40 | 1,24 | 32 |
| Яровая пшеница | | | | | | | |
| солома | 2,9 | 20 | 40 | 15 | 40 | 0,51 | 78 |
| корни | 4,0 | 21 | 29 | 17 | 38 | 0,70 | 55 |
| Просо | | | | | | | |
| солома | 5,9 | 23 | 34 | 15 | 39 | 1,04 | 38 |
| корни | 3,7 | 21 | 27 | 17 | 40 | 0,65 | 61 |
| Редька | | | | | | | |
| надземная масса | 8,7 | 14 | 25 | 13 | 28 | 1,68 | 17 |
| корни | 6,3 | 18 | 27 | 16 | 30 | 1,10 | 28 |

По содержанию трудноразалагаемых веществ виды соломы можно расположить в следующий ряд: озимая пшеница (56%) – яровая пшеница (55%) – просо (49%) – горох (35%). Самое широкое отношение C:N характерно для соломы озимой пшеницы, самое узкое – для соломы гороха и биомассы редьки.

При внесении в течение 7-ми лет соломы, меченой ^{14}C , повышение содержания углерода в почве останавливалось на пятый год [Широких, 2009]. Это свидетельствует о наступлении равновесия между количеством поступающего углерода соломы и углерода органического вещества почвы, теряющегося вследствие процессов минерализации. Таким образом, при ежегодном внесении соломы (3-9 т/га) накопление углерода составляет 0,1-0,3%, что свидетельствует о слабой консервирующей способности почвы в отношении свежего органического вещества. Это, по-видимому, является основной причиной, не позволяющей накапливать значительное количество гумуса в пахотных почвах за счет растительных остатков [Эндрюс, 1959].

Способностью накапливать гумус отличаются целинные почвы, не подвергающиеся механической обработке. В целинных почвах молодые гумусовые вещества слой за слоем осаждаются на поверхности почвенных частиц, создавая прочные органо-минеральные комплексы. Пленки гумусовых веществ препятствуют разрушительной деятельности микроорганизмов при ограниченном доступе кислорода. Обработка почвы исключает эти условия гумификации, в результате чего поступление большого количества растительных остатков становится недостаточным для накопления гумуса в почве.

Степень разложения соломы зависит от глубины заделки растительной биомассы (табл. 77). Так, через 30 суток разлагалось: в слое 0-10 см – до 40-60%, в слое 0-20 см – до 14-23%, при использовании в качестве мульчи – 20-38%.

Таблица 77. Динамика разложения массы соломы, % к исходному [Лебедева и др., 2006]

| Глубина заделки растительной массы, см | Продолжительность компостирования, сут. | | | |
|--|---|-----|-----|-----|
| | 30 | 210 | 362 | 728 |
| Озимая пшеница | | | | |
| Мульча – 0-3 | 201 | 63 | 76 | 81 |
| 0-10 | 46 | 71 | 76 | 90 |
| 0-20 | 14 | 75 | 80 | 93 |
| Яровая пшеница | | | | |
| Мульча – 0-3 | 20 | 61 | 76 | 82 |
| 0-10 | 40 | 73 | 80 | 92 |
| 0-20 | 14 | 75 | 80 | 96 |
| Просо | | | | |
| Мульча – 0-3 | 38 | 65 | 80 | 84 |
| 0-10 | 61 | 79 | 86 | 98 |
| 0-20 | 23 | 88 | 90 | 99 |

Через 210 суток в слое 0-10 см разлагалось 71-79% соломы, в слое 0-20 см 75-88%, при мульчировании – 61-88%. При этом просяная солома разлагается легче, чем пшеничная. Основная часть органического вещества соломы и остатков разлагалась в течение первых трех месяцев. Трансформация орга-

нических остатков в почве завершалась образованием новых групп лабильных гумусовых соединений.

Внесенная в почву солома зерновых культур способствовала росту содержания легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ). Наибольшее количество ЛОВ образуется при разложении гороховой соломы. При трансформации свежего органического вещества происходит накопление водорастворимых органических веществ (ВОВ) кислой природы вследствие того, что микроорганизмы обладают низкой способностью ассимилировать углерод карбоксильных групп [Туев, 1989]. Гороховая солома обеспечивала большее накопление ВОВ.

Максимальное количество лабильных гумусовых кислот (ЛГК) происходило при внесении гороховой соломы на 210 суток, а при внесении пшеничной соломы – на 360 суток. Накопление ЛГК в почве происходит при заделке соломы в слой 0-10 см, меньше – при мульчировании, еще меньше – в слой 0-20 см.

При запашке ячменной соломы (чернозем типичный, Ульяновская обл.) снижалось содержание N- NO₃ в почве под посевами гороха [Колсанов и др., 2002]. При этом снижались продуктивность и качество урожая гороха. Добавление к соломе азотного удобрения (10 и 20 кг N/т) почти полностью снимало отрицательное ее действие на горох. Внесение гороховой соломы позволило на 86-91% повысить новообразование гумуса и на 37-48% – накопление биологически связанного азота.

Внесение в почву соломы всех культур севооборота в течение 30 лет в этих же условиях повысило на 14-23% новообразование гумуса по сравнению с его минерализацией [Колсанов, 2006]. Поэтому в зернопропашных севооборотах с насыщенностью зерновыми на уровне 80% при полном возврате соломы в почву возможно создание бездефицитного баланса гумуса.

3.5. Потребление азота растениями

Потребление азота растениями в значительной мере зависит от типа и подтипа почвы и погодных условий, а также от применения органических и минеральных удобрений [1969; Войтенко, Иванова, 1974; Крутских, 1995; Доманов, 1995; Иванова, 2013; Юмашев, 2011]. Знание потребления азота необходимо прежде всего для определения доз азотных удобрений и соотношения с другими видами туков в конкретных почвенно-климатических условиях под конкретную культуру.

При выращивании в «одинаковых» условиях (чернозем выщелоченный, Тульская обл.) зерновых культур без удобрений наибольшее количество азота почвы потреблял овес (табл. 78). Овес также потреблял большее количество азота при внесении азотных удобрений, однако при внесении повышенных доз азота потребление азота растениями снижалось из-за полегания посевов [Бровкин, Синягина, 1982]. Ячмень на контроле потреблял наименьшее количество азота, однако при внесении удобрений он потреблял азота больше, чем озимая рожь. Озимая рожь практически потребляла одинаковое количество азота по всем вариантам опыта.

Таблица 78. Потребление азота зерновыми культурами севооборота в зависимости от доз азотных удобрений, кг/га [Бровкин, Синягина, 1982]

| Вариант | Культура | | |
|----------------------|----------|------|-------------|
| | ячмень | овес | озимая рожь |
| Без удобрений | 77 | 111 | 96 |
| $P_{80}K_{80}$ – фон | 87 | 122 | 100 |
| Фон+N ₄₀ | 105 | 122 | 100 |
| Фон+N ₈₀ | 119 | 133 | 106 |
| Фон+N ₁₂₀ | 122 | 121 | 103 |

На потребление азота растениями существенное влияние оказывают погодные и почвенные условия региона выращивания (табл. 79).

Таблица 79. Потребление азота сортами озимой пшеницы в зависимости от применяемых удобрений и погодных условий [Иванова, 2013], кг/га

| Вариант | Московская 39 | | Губернатор Дона | |
|---|---------------|-----|-----------------|-----|
| | 1* | 2 | 1 | 2 |
| Без удобрений | 26 | 160 | 62 | 181 |
| $P_{40}K_{40}$ – фон | 30 | 163 | 66 | 196 |
| Фон+N ₄₅ весной | 38 | 199 | 74 | 210 |
| Фон+N ₉₀ весной | 42 | 218 | 82 | 232 |
| Фон+N ₁₃₅ (90 весной + 45 осень) | 40 | 204 | 76 | 198 |
| Фон+N ₁₈₀ (90 весной + 90 осень) | 39 | 201 | 73 | 212 |

* 1 – засушливый год; 2 – оптимальный год.

Так, в засушливый год в условиях чернозема типичного (Тамбовская обл.) озимая пшеница сорта Московская 39 потребляла в 5 раз, а сорта Губернатор Дона в 2,8 раза меньше азота по сравнению с оптимальным годом. Растения сорта Губернатор Дона в засушливый год потребляли в 2 раза больше азота, чем сорт Московская 39, тогда как в оптимальный год – только в 1,1 раза. Озимая пшеница сорта Губернатор Дона как в засушливый, так и в оптимальный годы формировала больший урожай зерна, чем у сорта Московская 39.

Разнообразие почвенно-климатических условий, в которых возделывают сельскохозяйственные культуры, определяют размер потребления азота растениями (табл. 80). Так, значительное количество азота (150-170 кг/га) озимая пшеница потребляет при ее выращивании на карбонатном черноземе (Краснодарский край) в условиях орошения [Голубцов, 1973]. При выращивании пшеницы (Безостая 1) на фоне $P_{60}K_{30}$ растения потребляли до 150 кг N/га, что обеспечило формирование высокого урожая зерна (45,4 ц/га). Благодаря высокому уровню плодородия черноземов Краснодарского края озимая пшеница без применения удобрений потребляет значительное количество азота (90-120 кг N/га) [Симакин и др., 1969; Морозова, 1992; Коробской, 1995; Ладонин, 1998].

Таблица 80. Погребление азота сельскохозяйственными культурами на черноземных почвах России

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Урожайность основной продукции, ц/га | Вынос азота | | Автор, год |
|--|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|------------------------|
| | | | | кг/га | на 1 ц продукции | |
| Чернозем сильновыщелоченный, Тульская обл. | Горох | Последействие | 14,0-14,8 | 98-100 | 6,7-6,9 | Бровкин, Синягин, 1982 |
| | | N _{ам} ³ 48 | 19,6-22,8 | 112-134 | 5,7-5,9 | Макаров, 1990 |
| | | N _{ам} ³ 30 | 16,3-22,5 | 96-135 | 5,3-6,0 | Никитин, 1998 |
| | | N _{ам} ³ 35 | 17,8-28,4 | 107-173 | 6,0-6,1 | Хазиев, 1979 |
| | | N _{ам} ³ 60 | 24,1-33,0 | 111-174 | 4,3-5,3 | Трепачев, 1999 |
| | | N _{ам} ³ 30 | 9,7-13,1 | 32-46 | 3,3-3,5 | Ксенда, 1960 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | Гречиха | N _{ам} ³ 20, 60 | 15,8-19,5 | 57-78 | 3,6-4,0 | Соколов, 1970 |
| | | N _{ам} ³ 60 | 9,9-17,5 | 40-96 | 4,0-4,3 | Соколов, 1985 |
| | | N _{ам} ³ 90 | 15,8-24,3 | 55-99 | 3,5-4,1 | Соколов, 1985 |
| Чернозем оподзоленный, Орловская обл. | Капуста белокочанная | N _{ам} ³ 90 | 173-325 | 57-127 | 0,33-0,9 | Квасников, 1960 |
| | | N _{ам} ³ 90, 135 | 588-775 | 96-168 | 0,16-0,22 | Алмазов и др., 1976 |
| | | N _{ам} ³ 240 | 760-1020 | 278-436 | 0,36-0,42 | Назарюк, 1976 |
| Чернозем выщелоченный, Хмельницкая обл. | | N _{ам} ³ 135 | 470-721 | 67-289 | 0,16-0,20 | Алмазов, Холдяко, 1983 |

Продолжение табл. 80

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Урожайность основной продукции, ц/га | Вынос азота | | Автор, год |
|--|---------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|--------------------------|
| | | | | кг/га | на 1 ц продукции | |
| Чернозем выщелоченный, ЦЧЗ | | N _{ант} , 90 | 266-291 | 109-137 | 0,41-0,47 | Минеев и др., 1975 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | | N _{ант} , 30, 60 | 255-321 | 75-115 | 0,29-0,42 | Алмазов и др., 1976 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N _{ант} , 160 | 241-328 | 94-176 | 0,39-0,46 | Закладная и др., 1980 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | | N _{ант} , 30 | 282-356 | 76-115 | 0,27-0,34 | Алмазов, Холдяко, 1983 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | Картофель | N _{ант} , 90 | 200-252 | 101-144 | 0,31-0,33 | Алмазов, Холдяко, 1990 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | | N _{ант} , 40 | 142-158 | 48-62 | 0,36-0,39 | Танделов, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | | N _{ант} , 40 | 128-162 | 43-58 | 0,34-0,36 | Танделов, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Башкортостан | | N _{ант} , 35, 60 | 158-221 | 65-104 | 0,41-0,47 | Хазаев, 1979 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | | N _{ант} , 60-120 | 230-292 | 92-131 | 0,40-0,45 | Назарюк, 2002 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | | N _{ант} , 60 | 174-189 | 47-79 | 0,27-0,42 | Крупкин, Крупкина, 1974 |
| Чернозем выщелоченный, Красноярский край | | N _{ант} , 60-150 | 216-271 | 56-108 | 0,26-0,40 | Беспалов, Гринберг, 1982 |
| Чернозем южный, Волгоградская обл. | | N _{ант} , 60, 90 | 209-277 | 52-92 | 0,25-0,33 | Волянов, Рубан, 1982 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | Кукуруза, з/м | N _{ант} , 40 | 273-328 | 63-112 | 0,23-0,31 | Сымаклин, Ширянин, 1985 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | | N _{ант} , 96 | 254-311 | 46-90 | 0,18-0,29 | Макаров, 1990 |
| Чернозем выщелоченный, Башкортостан | | N _{ант} , 35, 60 | 349-485 | 80-146 | 0,23-0,30 | Хазиев, 1979 |
| Чернозем типичный, Курская обл. | | N _{ант} , 80 | 341-535 | 68-144 | 0,20-0,27 | Шустрова, 2000 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N _{ант} , 120 | 168-353 | 40-166 | 0,24-0,30 | Назарюк, 2002 |

Продолжение табл. 80

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Урожайность основной продукции, ц/га | Вынос азота | | Автор, год |
|--|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|------------------------|
| | | | | кг/га | на 1 ц продукции | |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Морковь столовая | N _{ам} [*] 60 | 291-332 | 49-96 | 0,17-0,23 | Журбицкий, 1963 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | | N _{ам} [*] 40 | 421-586 | 70-123 | 0,17-0,21 | Алмазов и др., 1976 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | | N _{ам} [*] 40 | 412-539 | 60-100 | 0,14-0,19 | Алмазов, Холдяко, 1983 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | Овес | N _{ам} [*] 60 | 17,0-23,6 | 49-71 | 2,9-3,0 | Трофимов, 1977 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N _{ам} [*] 50 | 35,2-42,2 | 106-169 | 3,0-4,0 | Закладная и др., 1980 |
| Чернозем типичный, Башкортостан | | N _{ам} [*] 120 | 28,8-40,3 | 98-173 | 3,4-4,3 | Хазиев, 1979 |
| Чернозем выщелоченный, Тульская обл. | Огурцы | N _{ам} [*] 30 | 24,8-30,2 | 74-103 | 3,0-3,4 | Бровкин, 2000 |
| Чернозем выщелоченный, Тульская обл. | | N _{ам} [*] 60 | 26,4-35,4 | 79-131 | 3,0-3,7 | Бровкин, 2008 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | | N _{ам} [*] 60 | 325-344 | 33-53 | 0,23-0,26 | Алмазов и др., 1976 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | Огурцы | N _{ам} [*] 60 | 286-377 | 28-46 | 0,09-0,12 | Алмазов, Холдяко, 1983 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | | N _{ам} [*] 60, 90 | 304-410 | 69-96 | 0,19-0,22 | Назарюк, 1983 |

Продолжение табл. 80

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Урожайность основной продукции, ц/га | Вынос азота | | Автор, год |
|---|--|---|--------------------------------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| | | | | кг/га | на 1 ц продукции | |
| Чернозем обыкновенный, Краснодарский край | Озимая пшеница | N _{ам} [*] 60 | 39,7-44,8 | 119-152 | 3,0-3,4 | Симакин, Усенко, 1969 |
| Чернозем карбонатный, Краснодарский край | | N _{ам} [*] 90 | 45,4-49,0 | 150-172 | 3,3-3,5 | Голубов, 1973 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | | N _{ам} [*] 96 | 27,4-32,3 | 71-90 | 2,6-2,8 | Макаров, 1990 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | | N _{ам} [*] 50-150 | 34,2-50,6 | 92-152 | 2,7-3,0 | Морозова, 1992 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | N _{ам} [*] 45, 90 | 24,3-70,3 | 66-196 | 2,7-2,8 | Доманов, 1995 |
| Чернозем обыкновенный, Краснодарский край | | N _{ам} [*] 90 | 36,3-40,5 | 112-134 | 3,1-3,3 | Коробской, 1995 |
| Чернозем обыкновенный, Краснодарский край | | N _{ам} [*] 60, 120, 240 | 40,4-69,1 | 105-200 | 2,6-2,9 | Ладонин, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Тульская обл. | | N _{ам} [*] 60 | 28,0-48,9 | 81-152 | 2,9-3,1 | Бровкин, 2000 |
| Чернозем обыкновенный, Кабардино-Балкария | | N _{ам} [*] 49, 69, 87 | 18,9-56,0 | 49-174 | 2,6-3,1 | Шаов, 2003 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | | N _{ам} [*] 50-150 | 37,1-42,2 | 94-120 | 2,5-2,8 | Смирнова, 2007 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | | N _{ам} [*] 40,80,120 | 16,9-59,9 | 62-212 | 3,5-3,7 | Иванова, 2013 |
| Чернозем выщелоченный, Тамбовская обл. | | N _{ам} [*] 90 | 34,2-45,3 | 72-104 | 2,1-2,3 | Юмашев, 2011 |
| Чернозем выщелоченный, Мордовия | N _{ам} [*] 60 | 22,4-30,2 | 56-91 | 2,5-3,0 | Костров, Хопов, 1971 | |
| Чернозем выщелоченный, Воронежская обл. | N _{ам} [*] 30 | 25,8-31,6 | 75-111 | 2,9-3,5 | Кощева, 1974 | |
| Чернозем выщелоченный, Башкортостан | N _{ам} [*] 35, 60 | 19,4-23,9 | 46-91 | 2,4-3,1 | Хазиев, 1998 | |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | N _{ам} [*] 40, 80, 120 | 33,9-46,2 | 105-166 | 3,1-3,6 | Ладонин, 1998 | |

Продолжение табл. 80

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Урожайность основной продукции, ц/га | Вынос азота | | Автор, год |
|--|--------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|----------------------|
| | | | | кг/га | на 1 ц продукции | |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | Подсолнечник | N _{ант} , 45 | 22,7-22,9 | 75-80 | 3,3-3,5 | Игнатьев, 1968 |
| | | N _{ант} , 90 | 26,1-27,4 | 86-96 | 3,3-3,5 | Белевцев, 1971 |
| Чернозем обыкновенный, Ростовская обл. | Подсолнечник | N _{ант} , 60 | 17,5-20,8 | 67-88 | 3,6-3,9 | Стулин, 1981 |
| Чернозем выщелоченный, Воронежская обл. | | N _{ант} , 44, 69, 87 | 6,8-22,4 | 20-81 | 3,0-3,6 | Шаов, 2003 |
| Чернозем обыкновенный, Кабардино-Балкария | Подсолнечник | N _{ант} , 45 | 5,0-14,0 | 12-41 | 2,5-2,9 | Ксеода, 1960 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | | N _{ант} , 45 | 16,0-19,0 | 45-57 | 2,8-3,0 | Бородин, 1961 |
| Чернозем обыкновенный, Ростовская обл. | Просо | N _{мт} , 30 | 16,0-21,0 | 45-65 | 2,8-3,1 | Держбина и др., 1975 |
| Чернозем выщелоченный, Челябинская обл. | | N _а , 75, 150 | 43,8-56,1 | 83-123 | 1,9-2,2 | Смирнова и др., 1976 |
| Лугово-черноземовидная, Краснодарский край | Рис | N _{мт} , 60, 120, 180 | 52,0-76,7 | 94-169 | 1,8-2,2 | Бочкарев, 1984 |
| Лугово-черноземовидная, Краснодарский край | | N _а , 180 | 34,6-51,3 | 69-118 | 2,0-2,3 | Кремзин, 1990 |
| Черноземно-луговая, Краснодарский край | Просо | N _{мт} , 120 | 37,3-64,6 | 82-122 | 1,9-2,2 | Кореньков, 1999 |
| Лугово-черноземовидная, Краснодарский край | | | | | | |

Продолжение табл. 80

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Урожайность основной продукции, ц/га | Вынос азота | | Автор, год |
|---|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------|----------------------|------------------------|
| | | | | кг/га | на 1 ц продукции | |
| Чернозем предкавказский, Краснодарский край | Сахарная свекла | N _{ант} , 60, 90, 120 | 393-475 | 170-293 | 0,43-0,62 | Аникет, Синицын, 1972 |
| Чернозем мощный, Сумская обл. | | N _{ант} , 60, 90, 120 | 258-390 | 103-196 | 0,40-0,56 | Аникет, Синицын, 1972 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | | N _{ант} , 60, 120 | 402-471 | 157-248 | 0,39-0,53 | Сивак, Марченко, 1973 |
| Чернозем выщелоченный, Воронежская обл. | | N _{ант} , 60 | 296-329 | 127-161 | 0,43-0,49 | Минеев и др., 1975 |
| Чернозем средневыщелоченный, Воронежская обл. | | N _{ант} , 80, 160 | 225-294 | 101-147 | 0,45-0,51 | Мазепин, Красных, 1977 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | | N _{ант} , 40 | 349-419 | 140-180 | 0,40-0,43 | Симакин, Ширинян, 1985 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | | N _{ант} , 96 | 273-366 | 117-183 | 0,44-0,50 | Макаров, 1990 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | N _{ант} , 120, 180, 240 | 282-440 | 112-263 | 0,40-0,60 | Луккин, 1992 |
| Чернозем выщелоченный, Башкортостан | | N _{ант} , 90, 120 | 203-359 | 67-206 | 0,33-0,57 | Амиров, 1992 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | | N _{ант} , 45, 90, 180 | 395-490 | 162-220 | 0,41-0,45 | Бусержа, 1996 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | N _{ант} , 140 | 298-422 | 119-190 | 0,40-0,45 | Медведев, 1996 |
| Чернозем выщелоченный, Липецкая обл. | | N _{ант} , 180 | 291-500 | 116-225 | 0,40-0,45 | Воронин, 1997 |
| Чернозем выщелоченный, Ульяновская обл. | N _{ант} , 60 | 327-379 | 131-186 | 0,40-0,49 | Куликова и др., 2007 | |
| Чернозем обыкновенный, Воронежская обл. | N _{ант} , 120 | 477-554 | 191-249 | 0,40-0,45 | Супрун, 2008 | |
| Чернозем выщелоченный, Тамбовская обл. | N _{ант} , 180 | 257-371 | 107-190 | 0,41-0,51 | Юмашев, 2011 | |
| Чернозем выщелоченный, Воронежская обл. | N _{ант} , 60-180 | 175-267 | 78-136 | 0,44-0,51 | Илюшенко, 2015 | |

Продолжение табл. 80

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Урожайность основной продукции, ц/га | Вынос азота | | Автор, год |
|--|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|-------------------------------|
| | | | | кг/га | на 1 ц продукции | |
| Чернозем обыкновенный, Ростовская обл. | Томаты | N _{ант} 45 | 319-360 | 54-68 | 0,17-0,19 | Журбицкий, 1963 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | | N _{ант} 60 | 346-426 | 44-73 | 0,12-0,17 | Алмазов и др., 1976 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Алтайский край | | N _{ант} 60 | 317-418 | 45-70 | 0,14-0,17 | Алмазов, Холдяко, 1983 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | | N _{ант} 90, 120 | 29-412 | 79-116 | 0,21-0,26 | Назарюк, 1983 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N _{ант} 60 | 11,6-17,1 | 29-48 | 2,5-2,8 | Захаров, Пшеничный 1975 |
| Чернозем обыкновенный, Воронежская обл. | | N _{ант} 30, 45, 60 | 29,7-30,3 | 80-90 | 2,7-3,0 | Захаров, Пшеничный, 1975 |
| Чернозем выщелоченный, Челябинская обл. | | N _{ант} 60 | 24,1-31,0 | 67-115 | 2,8-3,7 | Кушниренко, 1975 |
| Чернозем выщелоченный, Татарстан | | N _м 60, 90, 120 | 19,9-25,9 | 53-79 | 2,7-3,0 | Ломако и др., 1982 |
| Чернозем выщелоченный, Татарстан | | N _м 60, 90, 120 | 26,3-32,1 | 65-98 | 2,8-3,1 | Ломако и др., 1982 |
| Чернозем выщелоченный, Челябинская обл. | | Яровая пшеница | N _{ант} 60 | 13,7-20,7 | 37-62 | 2,7-3,0 |
| Чернозем выщелоченный, Тамбовская обл. | N _{ант} 40, 80 | | 17,8-26,0 | 48-81 | 2,7-3,1 | Болдов, Вислобокова, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Красноярский край | N _{ант} 30-120 | | 21,1-32,4 | 63-113 | 3,0-3,5 | Кражановская, Астафьева, 1991 |
| Чернозем южный, Саратовская обл. | N _{ант} 28, 35 | | 25,0-34,0 | 70-105 | 2,8-3,1 | Чуб и др., 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Башкортостан | N _{ант} 35-60 | | 20,9-28,3 | 61-90 | 2,9-3,2 | Хазиев, 1979 |
| Чернозем выщелоченный, Красноярский край | N _{ант} 90 | | 14,4-26,0 | 48-104 | 3,4-4,0 | Татцелов, 1998 |

Окончание табл. 80

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Урожайность основной продукции, ц/га | Вынос азота | | Автор, год |
|--|----------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|---------------------------|
| | | | | кг/га | на 1 ц продукции | |
| Чернозем типичный, Курская обл. | Яровая пшеница | N _{ант} 80 | 27,9-34,6 | 78-111 | 2,8-3,2 | Шустрова, 2000 |
| Чернозем выщелоченный, Пензенская обл. | | N _{ант} 32 | 23,3-31,9 | 65-102 | 2,8-3,2 | Лазарев, 2001 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | | N _{ант} 55 | 27,4-33,1 | 82-106 | 3,0-3,2 | Макаров, Архипова, 2001 |
| Чернозем выщелоченный, Курганская обл. | | N _{ант} 45 | 10,5-15,2 | 28-44 | 2,7-2,9 | Немченко, Рябина, 2007 |
| Чернозем выщелоченный, Курганская обл. | | N _{ант} 20, 40, 60 | 13,7-20,5 | 38-64 | 2,8-3,1 | Волонкин, Вольякина, 1999 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N _{ант} 70 | 27,8-40,1 | 75-124 | 2,7-3,1 | Закладная и др., 1980 |
| Чернозем сильновыщелоченный, Тульская обл. | | N _{ант} 40, 80, 120 | 31,9-41,0 | 87-122 | 2,8-3,4 | Бровкин, Силиягина, 1982 |
| Чернозем выщелоченный, Тамбовская обл. | | N _{ант} 40, 80 | 34,8-49,6 | 104-158 | 3,0-3,2 | Бодров, Вислобокова, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | | N _{ант} 30-120 | 18,3-28,3 | 40-74 | 2,2-2,6 | Танделов, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Красноярский край | | N _{ант} 30-120 | 18,8-31,8 | 47-102 | 2,5-3,2 | Рудай, 1998 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | Ячмень | N _{ант} 30, 60 | 23,3-43,0 | 73-133 | 3,0-3,1 | Евтушенко, 1991 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | | N _{ант} 60 | 16,9-27,5 | 36-86 | 2,2-3,1 | Трепачев, 1999 |
| Чернозем выщелоченный, Мордовия | | N _{ант} 60, 120, 180 | 18,3-34,0 | 39-96 | 2,2-3,0 | Ивойлов, 1997 |
| Чернозем выщелоченный, Мордовия | | N _{ант} 60, 120, 180 | 23,7-39,9 | 45-115 | 1,9-2,9 | Ивойлов, 1997 |
| Чернозем выщелоченный, Мордовия | | N _{ант} 60, 120, 180 | 23,6-41,3 | 55-139 | 2,3-4,0 | Ивойлов, 1997 |
| Чернозем выщелоченный, Мордовия | | | | | | |

На черноземах ЦЧР озимая пшеница без применения удобрений потребляла 70-90 кг N/га [Макаров, 1990; Доманов, 1995; Смирнова, 2006]. При внесении органических и минеральных удобрений потребление озимой пшеницей достигает 150-200 кг N/га.

Озимая рожь на черноземных почвах ЦЧР без применения удобрений способна накапливать 75-105 кг N/га, формируя урожай зерна 26-34 ц/га [Копцева, 1974; Ладонин, 1998]. При внесении азотных удобрений (120 кг/га) озимая рожь потребляет максимальное количество азота (166 кг N/га).

При возделывании яровой пшеницы на черноземах Европейской части страны потребление азота достигает 80-100 кг N/га, тогда как при ее выращивании в Сибири и Зауралье – 50-70 кг N/га [Ломако и др., 1982; Хазиев, 1979; Чуб и др., 1998; Шустова, 2000; Лазарев, 2001]. При внесении азотных удобрений (черноземы Татарстана и Новосибирской обл.) овес потребляет до 170 кг N/га [Закладная и др., 1980; Хазиев, 1979]. В нормальные по увлажнению годы ячмень потреблял до 46 кг N/га выщелоченного чернозема, тогда как в засушливые годы потребление азота растениями снижается на 20%, а при избыточном увлажнении – возрастает, на те же 20% [Ивойлов, 1997]. Во влажные годы ячмень способен накопить до 158 кг N/га. При внесении азотных удобрений обычно ячмень потребляет 120-170 кг N/га.

При потреблении 40-70 кг N/га картофель способен формировать урожай 140-170 ц/га клубней. Значительное количество азота (130-180 кг/га) картофель потребляет при его выращивании на черноземных почвах Западной Сибири [Закладная и др., 1980; Назарюк, 2004]. Несколько меньшее количество азота (115-140 кг/га) картофель потреблял на черноземах Алтайского края [Алмазов и др., 1990]. Незначительное количество азота (50-60 кг/га) картофель потребляет на черноземах Красноярского края, что обеспечивает формирование урожая клубней в пределах 150-160 ц/га [Танделов, 1998].

На выщелоченном черноземе (Курская обл.) в год с минимальным количеством осадков сахарная свекла без применения удобрений потребляла на 30 кг N/га больше, чем в прохладном и более влажном году [Сивак, Марченко, 1973]. Внесение аммиачной селитры (60-120 кг/га) повышало потребление азота растениями более чем на 100 кг N/га в благоприятный год (255-283 кг N/га) по сравнению с прохладным годом (146-168 кг N/га). Свыше 250 кг N/га сахарная свекла потребляет при внесении азотных удобрений на черноземах Центрального Черноземья [Лукин, 1992; Супрун, 2008]. При потреблении 200-225 кг N/га свекла может формировать урожай в пределах 360-500 ц/га [Амиров, 1992; Бусержа, 1996; Воронин, 1997].

Внесение азотных удобрений (90 кг/га) в условиях чернозема южного (Волгоградская обл.) обеспечило потребление 92 кг N/га [Водянов, Рубан, 1982]. При внесении азотных удобрений (60-80 кг/га) кукуруза потребляла 140-150 кг N/га в условиях черноземов ЦЧР и Татарстана [Хазиев, 1998; Шустрова, 2000].

Особенностью гороха является то, что без применения удобрений он потребляет 100-130 кг N/га [Макаров, 1990; Хазиев, 1979]. Такое же количество азота горох потреблял при последствии удобрений [Бровкин, Синягин, 1982]. При внесении небольших доз азотных удобрений (30-48 кг/га) горох потреблял 130-170 кг N/га, включая симбиотический азот [Никитин, 1998; Хазиев, 1979].

В условиях затопления (лугово-черноземные почвы, Краснодарский край) рис потребляет 80-90 кг N/га [Бочкарев, 1984; Кореньков, 1999]. Наибольшее количество азота рис потреблял при внесении мочевины в рядки с семенами (169 кг N/га), что обеспечивало формирование урожая зерна 77 ц/га [Бочкарев, 1984]. Внесение мочевины (120 кг/га) совместно с семенами возможно только в условиях тяжелых сильнофиксирующих лугово-черноземных почв при затоплении, когда процессы окисления существенно подавлены.

Потребление азота возделываемыми культурами существенно зависит от подтипа чернозема, на котором их выращивают (табл. 81). Для большинства культур (вика, вика-овес, горох, гречиха, картофель, клевер, кукуруза, люцерна, многолетние травы, овес, озимая рожь, соя, яровая пшеница, ячмень) характерно наибольшее потребление азота при выращивании их на выщелоченном черноземе; снижение потребления азота идет в сторону оподзоленного, обыкновенного и южного черноземов. Максимальное количество азота озимая пшеница потребляет на обыкновенном и выщелоченном черноземах; сахарная свекла – на обыкновенном черноземе; подсолнечник – на типичном черноземе. Максимальное количество азота (550 кг/га) сахарная свекла потребляет на обыкновенном черноземе и кукуруза на типичном черноземе (540 кг N/га). Минимальное количество азота потребляли гречиха (40-60 кг N/га) и подсолнечник (20-70 кг N/га) на всех подтипах черноземов.

Таблица 81. Потребление азота сельскохозяйственными культурами, выращиваемыми на различных подтипах черноземов, кг/га

| Культура | Чернозем | | | | |
|---------------------|--------------|----------|--------------|--------------|---------|
| | оподзоленный | типичный | выщелоченный | обыкновенный | южный |
| Вика | 90-130 | 110-150 | 130-170 | 110-140 | - |
| Вика-овес, сено | 75-110 | 110-130 | 130-140 | 100-120 | - |
| Горох | 90-120 | 110-130 | 90-170 | - | - |
| Гречиха | 40-100 | 50-100 | 60-100 | - | - |
| Картофель | 120-290 | 170-280 | 160-290 | - | - |
| Клевер, сено | 80-110 | 120-150 | 130-170 | 140-150 | - |
| Кукуруза, з/м | 200-250 | 340-540 | 350-480 | 220-270 | 210-280 |
| Кукуруза, зерно | 100-150 | 140-225 | 140-220 | 105-160 | - |
| Люцерна, сено | 90-140 | 160-230 | 170-270 | 170-300 | 160-290 |
| Мн. боб.-злак травы | 80-100 | 110-130 | 120-140 | - | - |
| Мн. злак. травы | 70-80 | 100-110 | 120-130 | - | - |
| Овес | 70-100 | 120-130 | 110-170 | - | - |
| Озимая пшеница, ч/п | 90-135 | 100-210 | 100-200 | 100-190 | 100-130 |
| Озимая пшеница, з/п | 100-140 | 120-240 | 125-240 | 105-200 | 100-150 |
| Озимая пшеница, н/п | 70-135 | 80-195 | 90-150 | 90-140 | - |
| Озимая рожь | 100-110 | 110-170 | 70-150 | - | - |
| Подсолнечник | 40-90 | 60-100 | 70-90 | 20-80 | - |
| Сахарная свекла | 210-350 | 270-440 | 220-490 | 390-550 | - |
| Соя | - | 100-180 | 130-220 | - | - |
| Яровая пшеница | 60-100 | 80-110 | 50-100 | 60-90 | 70-110 |
| Ячмень | 60-100 | 70-130 | 90-160 | - | - |

Примечание: ч/п – чистый пар; з/п – занятой пар; н/п – непаровые предшественники.

Одним из показателей потребности сельскохозяйственных культур в азоте являются его затраты на формирование единицы урожая основной продукции (табл. 82). По «Нормативам выноса ...» [1991] затраты на 1 т зерна и соответствующее количество соломы озимая пшеница в целом по стране тратит 26-31 кг азота. Однако в условиях различных подтипов черноземов эта величина находится в пределах 22-37 кг азота. При этом отклонение от Нормативов составляет 26-39%. Отклонения затрат от нормативов по другим культурам составляют: соя – 30%, сахарная свекла и ячмень – 27%, картофель – 20%, кукуруза (зерно) – 14% и т.д. Большинство культур наибольшее количество азота тратят при их выращивании на черноземе типичном, тогда как соя и яровая пшеница – на черноземе выщелоченном. Ряд культур (картофель, кукуруза зерно, овес) тратят максимальное количество азота на формирование 1 т продукции при выращивании их на типичном и выщелоченном черноземе. Таким образом, при определении затрат азота на единицу продукции сельскохозяйственными культурами необходимо учитывать подтип чернозема, на котором их выращивают.

Таблица 82. Затраты азота культурами на формирование единицы основной продукции, кг/т

| Культура | Чернозем | | | | | «Нормативы выноса...», 1991 |
|-----------------------------------|--------------|----------|--------------|--------------|-------|-----------------------------|
| | оподзоленный | типичный | выщелоченный | обыкновенный | южный | |
| Вика | 55-59 | 60-67 | 59-61 | 57-60 | - | 62-65 |
| Вика-овес, сено | 16-18 | 19-24 | 18-22 | 17-18 | 16-17 | 17-23 |
| Горох | 44-49 | 49-50 | 50-57 | 43-46 | - | 44-56 |
| Гречиха | 27-35 | 40-44 | 30-36 | 29-34 | - | 27-44 |
| Картофель | 5,5-5,7 | 6,7-7,7 | 7,1-7,7 | 5,6-6,1 | - | 5,7-6,4 |
| Клевер, сено | 18-21 | 24-26 | 22-24 | 19-20 | 18-19 | 20-22 |
| Кукуруза, зеленая масса | 2,3-2,9 | 3,7-5,4 | 2,9-3,7 | 2,2-2,9 | - | 2,2-3,4 |
| Кукуруза, зерно | 22-23 | 28-31 | 27-32 | 26-28 | 20-23 | 24-28 |
| Люцерна, сено | 21-23 | 25-28 | 23-25 | 21-23 | 20-21 | 26-29 |
| Овес | 20-26 | 20-24 | 18-24 | - | - | 26-30 |
| Озимая пшеница (по чистому пару) | 28-37 | 29-39 | 24-36 | 22-31 | 23-29 | 26-31 |
| Озимая пшеница (по занятому пару) | 24-29 | 27-37 | 25-34 | 21-30 | 22-28 | 26-31 |
| Озимая пшеница | 28-30 | 28-31 | 27-30 | - | - | 26-30 |
| Озимая рожь | 29-33 | 29-32 | 23-29 | - | - | 26-30 |
| Подсолнечник | 40-43 | 43-47 | 41-45 | 41-47 | - | 40-46 |
| Сахарная свекла | 3,9-5,2 | 4,4-5,6 | 4,1-5,3 | 3,7-3,8 | - | 3,7-4,4 |
| Соя | - | 54-58 | 82-86 | 70-76 | 65-68 | 61-66 |
| Яровая пшеница | 22-24 | 24-28 | 24-30 | 22-25 | - | 27-31 |
| Ячмень | 22-25 | 28-36 | 24-33 | 23-27 | 18-22 | 22-29 |

Примечание: ч/п – чистый пар; з/п – занятой пар.

Потребление (вынос, накопление) азота определяется биологическими особенностями возделываемой культуры, куда входят: поглощение ионов NO_3^- и NH_4^+ корневыми системами, ближний и дальний их транспорт, распределение между органами, ассимиляция и реутилизация, накопление в репродуктивных и вегетативных органах, отток из корней, вымывание из различных органов осадками, потери в процессе эватранспирации и отчуж-

дение с высыхающими и опадающими органами. В специальной литературе зачастую вынос азота ставят в прямую зависимость от продуктивности растений [Войтенко, Иванова, 1974; Доманов, 1995; Кореньков, 1999; Козлова, 2015]. Тем не менее хорошо известно, что элементы питания (в том числе азот) являются тем первичным «строительным материалом», необходимым для биосинтеза биомассы растений (табл. 83). Снижение прироста биомассы растений (в том числе урожая) при неблагоприятных гидротермических условиях связано в первую очередь с подавлением процессов поступления (поглощения) азота в корневую систему, транспорта и ассимиляции, а не наоборот. Зачастую потребность в азоте и его использование растениями отождествляют с процессами его поглощения [Гамзиков, Барсуков, 2001]. Хотя поглощение – это только первый этап поступления азота в клетки корня.

Таблица 83. Примеры нарушения причинно-следственных связей при обсуждении потребления азота растениями

| Изложение текста в оригинале | Автор, год |
|--|-------------------------|
| «Вынос питательных элементов с урожаями культур под влиянием удобрений увеличивался в результате повышения урожайности ...» (с. 46) | Войтенко, Иванова, 1974 |
| «... накопление азота идет параллельно нарастанию сухой массы ...» (с. 92) | Назарюк, 1976 |
| «Потребление питательных элементов сахарной свеклой зависело от интенсивности нарастания сухой массы листьев и корней ...» (с. 71) | Савченко, 1980 |
| «Вынос азота, фосфора и калия зависит от урожая зерна и соломы и содержания в них этих элементов» (с. 32) | Доманов, 1995 |
| «Хозяйственный вынос элементов питания растениями определялся величиной урожая» (с. 23) | Ивойлов, 1997 |
| «в соответствии с урожаем находился общий вынос азота растениями ...» (с. 160) | Кореньков, 1999 |
| «Чем выше продуктивность растений в опытах, тем лучше используется азот удобрений» (с. 77) | Назарюк, 2002 |
| «... в силу более высокого урожая корнеплодов и ботвы, отмечен повышенный вынос питательных элементов» (с. 18) | Никульников и др., 2005 |
| «Вынос питательных веществ кукурузой был обусловлен, прежде всего, ее продуктивностью ...» (с. 28) | Стулин, 2007 |
| «Повышение содержания питательных элементов в растениях в зависимости от доз вносимых удобрений за счет роста урожайности» (с. 17) | Козлова, 2015 |
| «... применение удобрений под яровую пшеницу, возделываемую в севообороте, повышало урожайность и, соответственно, вынос азота, фосфора, калия зерном ...» (с. 16) | Волошин, 2017 |
| «Вынос питательных веществ способен значительно измениться в зависимости от величины урожая и побочной продукции ...» (с. 26) | Мухина, 2017 |

Характеризуя азотный режим типичного чернозема (Воронежская обл.), Мязин с соавторами (2006) утверждают: «Под озимой пшеницей и сахарной свеклой запасы минерального азота на удобренных вариантах были выше, чем на контроле... К уборке запас его резко сокращался, что связано с потреблением его урожаем». Еще к большей неопределенности приводит утверждение: «чем выше продуктивность растений, тем лучше используется азот удобрений» [Назарюк, 2002]. Во-первых, потребление и условие азота (наряду с другими факторами) определяют формирование урожая растений, а не наоборот. Во-вторых, использование азота удобрения растениями не несет физиологической нагрузки [Соколов, Семенов, 1994; Завалин, Соколов, 2016].

По мнению ряда авторов [Назарюк, 1975; Савченко, 1980], накопление азота в растениях идет параллельно нарастанию сухой массы. Во-первых, все наоборот, это нарастание сухой массы идет параллельно потреблению азота растениями, поскольку поступление азота первично, а рост биомассы вторичен. Во-вторых, на начальных этапах роста растений поступление азота идет опережающими темпами по отношению к биомассе (растет его концентрация), а в период максимального развития репродуктивных органов поступление азота по отношению к темпам роста биомассы снижается, усиливается его реутилизация, в результате чего наблюдается «эффект разбавления». Таким образом, этот эффект проявляется не в период полного созревания урожая, а значительно раньше.

3.6. Потребление и использование азота удобрения и азота черноземных почв растениями

Стратегия оптимизации азотного питания растений в условиях черноземов предусматривает получение высоких и устойчивых урожаев, повышение качества продукции, сокращение удельных затрат азота удобрения и азота почвы на формирование урожая, минимизацию удобрительной нагрузки на компоненты агроэкосистемы. В продукционном процессе возделываемых культур непосредственное участие принимают азот удобрения и азот почвы. Характер их использования в значительной степени зависит от онтогенетического состояния растений и степени доступности азота в почве. Чем лучше растения будут использовать азот удобрения и активнее усваивать поглощенное его количество, тем выше будет агрохимическая эффективность применяемых удобрений и ниже экологическая напряженность в агроландшафте [Соколов, Семенов, 1994; Сычев и др., 2012; Завалин, Соколов, 2016; Никитин, Завалин, 2017; Никитин, 2017].

В условиях черноземных почв при внесении азотных удобрений, меченых ^{15}N , возделываемые сельскохозяйственные культуры используют 14-68% азота удобрения (табл. 84, 85). Наиболее эффективно азот удобрения в условиях черноземов используют капуста белокочанная и кукуруза на зеленую массу (68 и 57% соответственно); менее эффективно (40-46%) – озимая пшеница, сахарная свекла и лук. Остальные культуры используют 35-38% азота удобрения. Минимальное количество азота использует озимая рожь (до 23% от внесенного). В условиях тяжелых лугово-черноземных почв (Краснодарский край) рис использует незначительное количество азота (17-21%). При внесении мочевины локально (совместно с семенами) растения используют до 48% азота удобрения [Бочкарев, 1984]. Большим интервалом использования азота удобрения отличается сахарная свекла: от 14-15% при выращивании на черноземе выщелоченном (Черниговская обл.) до 49-56% – на черноземе слабовыщелоченном (Белгородская обл.) [Дмитренко, 1977; Зубенко, 1977]. Так же нестабильно использовала удобрения яровая пшеница: от 26-36% при выращивании на черноземе выщелоченном (Зауралье) до 28-51% – на лугово-черноземной почве (Курганская обл.) [Кушниренко, 1985; Овсянников, 1991].

Таблица 84. Использование азота минеральных удобрений сельскохозяйственными культурами на черноземных почвах, % от вносимой дозы

| Почва, регион | Сельскохозяйственная культура | Форма и доза азотного удобрения | Использование азота удобрения | Автор, год |
|---|-------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------|
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Капуста | N _a , 240 | 60-68 | Назарюк, 1989 |
| Чернозем типичный, Ставропольский край | Картофель | N _a , N _c , 90 | 30-33 | Смирнов, 1970 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | | N _a , 30-120 | 29-39 | Назарюк, 1989 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | Кукуруза на силос | N _a , 90 | 45-50 | Явтушенко, 1991 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | | N _a , 120 | 62-64 | Кореньков, 1999 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Лук | N _{aa} , 60 | 25-46 | Назарюк, 1983 |
| Чернозем предкавказский, Ставропольский край | Озимая пшеница | N _{aa} , 60 | 33-37 | Смирнов, 1977 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | | N _a , 30 | 45-50 | Явтушенко, 1991 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | | N _a , 30 | 45-50 | Кореньков, 1999 |
| Чернозем предкавказский, Ставропольский край | Озимая пшеница (орошение) | N _{aa} , 60,120 | 34-42 | Смирнов, 1977 |
| Чернозем оподзоленный, Томская обл. | Озимая рожь | N _a , N _m , 120 | 16-23 | Гамзиков, Барсуков, 2001 |
| Лугово-черноземная, Краснодарский край | Рис | N _a , N _m , 120 | 17-21 | Смирнова и др., 1976 |
| Лугово-черноземная, Краснодарский край | | N _m , 120 | 20-48 | Бочкарев, 1984 |
| Чернозем выщелоченный, Воронежская обл. | Сахарная свекла | N _a , 50-200 | 33-49 | Бондаренко, 1989 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | N _c , 120 | 30-53 | Лукин, 1992 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Белгородская обл. | | N _{aa} , N _a , N _m , 1-6г/сосуд | 49-56 | Зубенко, 1977 |
| Чернозем предкавказский, Ставропольский край | Яровая пшеница | N _a , N _c , 90 | 31-33 | Смирнов, 1970 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N _{aa} , N _a , 60-120 | 31-40 | Гамзиков и др., 1985 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N _m , 60 | 28-36 | Емельянова, 1985 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | | N _a , 60 | 33-35 | Прозоров, 1985 |
| Чернозем выщелоченный, Зауралье | | N _{aa} , 40-160 | 26-160 | Куширенко, 1985 |
| Лугово-черноземная, Курганская обл. | | N _a , 80 | 33-35 | Овсянников, 1991 |
| Лугово-черноземная, Курганская обл. | | N _c , 80 | 37-38 | Овсянников, 1991 |
| Лугово-черноземная, Курганская обл. | | N _m , 80 | 28-51 | Овсянников, 1991 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | | N _a , 30-90 | 41-51 | Явтушенко, 1991 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | | N _a , 40 | 27-43 | Кореньков, 1999 |

Таблица 85. Коэффициент использования азота минерального удобрения сельскохозяйственными культурами на черноземных почвах (Исследования с ^{15}N , средние данные)

| Культура | Использование азота удобрения растениями, % от применяемых доз |
|--------------------------------|--|
| Капуста | 60-68 |
| Картофель | 30-36 |
| Кукуруза з/м | 53-57 |
| Лук | 25-46 |
| Озимая пшеница | 36-40 |
| Озимая пшеница, орошение | 34-42 |
| Озимая рожь | 16-23 |
| Сахарная свекла | 31-42 |
| Рис | 16-35 |
| Яровая пшеница | 30-38 |
| Ячмень | 29-36 |
| Среднее от меньшего к большему | 33-42 |
| Общее среднее | 38 |

Потребление и использование азота удобрений растениями находятся в сопряженной зависимости от плодородия почвы. Однако различные типы почв разделены пространственно, в результате чего на режим азотного питания растений влияют другие факторы. Поэтому важно было выяснить, как влияет тип почвы на использование азота удобрений растениями, возделываемыми в одинаковых (сопоставимых) условиях. Этот принцип удастся соблюдать в условиях микрополевого опыта. Максимальное количество азота удобрения гречиха использовала при выращивании ее на черноземе выщелоченном (Орловская обл.) как при разбросном, так и локальном применении сульфата аммония (табл. 86). При выращивании гречихи на дерново-подзолистой и серой лесной почве растения использовали одинаковое количество азота удобрения при разбросном и локальном способе внесения удобрений соответственно.

Таблица 86. Использование азота сульфата аммония гречихой на различных почвах при локальном и разбросном внесении азотных удобрений

| Почвы, регион | Способ внесения азотных удобрений | Использование азота удобрения, % от внесенного |
|---------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Дерново-подзолистая, Московская обл. | вразброс | 44,3 |
| | локально | 63,3 |
| Серая лесная, Московская обл. | вразброс | 41,0 |
| | локально | 62,5 |
| Чернозем выщелоченный, Орловская обл. | вразброс | 62,5 |
| | локально | 88,3 |

При выращивании гречихи на черноземе растения использовали такое же количество азота удобрения при разбросном применении удобрений, как при локальном применении на дерново-подзолистой и серой лесной почвах.

В первый год выращивания культуры севооборота (чернозем выщелоченный, Пензенская обл.) использовали 36-43% азота сульфата аммония, меченого ^{15}N (табл. 87).

Таблица 87. Баланс азота удобрения (^{15}N) в выщелоченном черноземе [Власова, 1999]

| Вариант | Статьи баланса | Значения баланса | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------|-----|-----------|-----|
| | | в 1 год | | на 3 года | |
| | | г/сосуд | % | г/сосуд | % |
| Горох, озимая рожь, овес | Внесение с удобрениями | 2,25 | 100 | 2,25 | 100 |
| | Вынос с урожаем | 0,97 | 43 | 1,08 | 48 |
| | Закрепление в почве | 1,14 | 50 | 0,97 | 43 |
| | Вымывание с инфильтрационными водами | 0,02 | 1 | 0,06 | 3 |
| | Неучтенные потери | 0,12 | 6 | 0,14 | 6 |
| Кукуруза, озимая рожь овес | Внесение с удобрениями | 2,25 | 100 | 2,25 | 100 |
| | Вынос с урожаем | 0,82 | 36 | 0,89 | 40 |
| | Закрепление в почве | 1,03 | 46 | 0,93 | 41 |
| | Вымывание с инфильтрационными водами | 0,02 | 1 | 0,06 | 3 |
| | Неучтенные потери | 0,38 | 17 | 0,37 | 16 |
| Пар чистый, озимая рожь овес | Внесение с удобрениями | 2,25 | 100 | 2,25 | 100 |
| | Вынос с урожаем | - | - | 0,86 | 38 |
| | Закрепление в почве | 1,84 | 81 | 1,06 | 47 |
| | Вымывание с инфильтрационными водами | 0,02 | 1 | 0,06 | 3 |
| | Неучтенные потери | 0,39 | 17 | 0,27 | 12 |

При внесении азотных удобрений в пару использование азота удобрения растениями снижалось, поскольку возрастало закрепление в почве (81% от внесенного) и газообразные потери азота до 18%. На 2-3-й год после внесения удобрений растения использовали 4-5% закрепленного азота удобрения. В целом за 3 года растения севооборота использовали 38-48% азота удобрения.

Таблица 88. Использование азота растениями при разбросном и локальном внесении азотных удобрений, % от внесенного

| Почва, регион | Культура | Форма и доза N-удобрения | Способ внесения | | Автор, год |
|---|-----------------|----------------------------|-----------------|----------|------------------|
| | | | вразброс | локально | |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Капуста | N_a , 1800 мг/дел | 21 | 31 | Назарюк, 2002 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Картофель | N_a , 630 мг/дел | 49 | 66 | Назарюк, 2002 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Лук | N_a , 600 мг/дел | 8 | 20 | Назарюк, 2002 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Морковь | N_a , 300 мг/дел | 51 | 59 | Назарюк, 2002 |
| Лугово-черноземная, Краснодарский край | Рис | N_a , 120 | 20 | 48 | Бочкарев, 1984 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Сахарная свекла | N_a , 500 мг/дел | 34 | 50 | Назарюк, 2002 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Томат | N_a , 420 мг/дел | 70 | 68 | Назарюк, 2002 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Яровая пшеница | N_{aa} , 60 | 20 | 26 | Емельянова, 1985 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Яровая пшеница | N_{aa} , 60 | 28 | 36 | Емельянова, 1985 |
| Среднее по способу | | | 33 | 44 | |

При выращивании сельскохозяйственных культур на черноземных почвах проявилась видовая специфика использования азота удобрения при локальном внесении азотных удобрений (табл. 88). При традиционном (разбросном) способе внесения удобрений растения используют 8-70% (среднее 33%) азота удобрения, при локальном способе – 26-68% (среднее 44%), т.е. в 1,3 раза больше. За исключением томатов, которые при разбросном способе использовали 70% внесенного азота, а при локальном – 68% [Назарюк, 2002]. Наиболее эффективно (в 2,4-2,5 раза) азот удобрения при локальном внесении использовали лук и рис. Все остальные культуры достаточно эффективно (в 1,2-1,5 раза) использовали азот удобрения при локальном способе применения.

Установлено также, что на черноземе типичном (Белгородская обл.) озимая пшеница использовала азот биомассы горчицы белой (меченой ^{15}N) в 1,4 раза меньше, чем азот мочевины (табл. 89).

Таблица 89. Потребление и использование азота удобрения и азота горчицы белой озимой пшеницей

| Вариант | Потребление N, г/м ² | | | Использование N удобрения, % от внесенного |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------|-------|--|
| | общий | удобрения | почвы | |
| P ₆₀ K ₆₀ – фон | 4,02 | - | 4,02 | - |
| Фон + ^{15}N м | 6,00 | 2,64 | 3,36 | 44 |
| Фон + $^{15}\text{Горчица}$ | 8,90 | 1,89 | 7,01 | 32 |
| Фон + 2/3 $^{15}\text{Г}$ + 1/3 Nм | 10,57 | 2,37 | 8,30 | 40 |

Примечание: Доза N в биомассе $^{15}\text{Горчицы}$ эквивалентна 60 кг/га азота.

При совместном внесении биомассы горчицы и мочевины использование азота горчицы пшеницей возросло в 1,2 раза, что свидетельствует об усилении процессов минерализации биомассы горчицы под действием мочевины. В то же время, если при внесении мочевины пшеница не использовала дополнительного количества азота почвы, то при внесении биомассы горчицы растения потребляли азот почвы в 1,7 раза больше по сравнению с контролем, что составляло 34% от общего его выноса пшеницей. При совместном внесении биомассы горчицы и мочевины потребление азота почвы озимой пшеницей увеличивалось еще больше.

Под действием азотных минеральных удобрений усиливается минерализация почвенного органического вещества, в результате чего растения потребляют дополнительное количество азота почвы («экстра»-азот) [Осипов, Соколов, 2001]. В зависимости от условий выращивания и биологических особенностей возделываемые культуры могут усваивать от 6 до 52% (общего выноса) азота черноземных почв (табл. 90). Наибольшее количество «экстра»-азота усваивала озимая пшеница (30-48% от общего выноса) в условиях черноземов типичного и выщелоченного (Белгородская обл.). Яровая пшеница в зависимости от условий выращивания потребляла 11-15% дополнительного азота почвы, кукуруза – 16% от общего выноса азота растениями.

Таблица 90. Влияние азотных удобрений на дополнительное использование азота почвы

| Почва, регион | Культура | Экстра-азот, % от общего выноса | | Автор, год |
|---|-----------------|---------------------------------|---------|------------------|
| | | пределы колебаний | средний | |
| Лугово-черноземная, Курганская обл. | Яровая пшеница | 8-23 | 13 | Овсянников, 1991 |
| Чернозем выщелоченный, Пензенская обл. | То же | 6-16 | 11 | Надежкина, 1994 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | Озимая пшеница | 12-56 | 30 | Явтушенко, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | Кукуруза, з/м | 6-24 | 16 | Явтушенко, 1988 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | Озимая пшеница | 43-52 | 48 | Явтушенко, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Яровая пшеница* | 0,6-28,6 | 15 | Гамзиков, 1981 |
| Лугово-черноземная, Забайкалье | Ячмень* | 9,8-17,5 | 14 | Пигарева, 2007 |

* % к контролю.

3.7. Использование азота растениями с различных глубин почвенного профиля черноземов

В силу генетических особенностей и гидротермических условий азот распределен неравномерно по профилю черноземных почв. Вследствие неравномерного распределения азота по профилю почв его поглощение корнями растений растянуто во времени, в результате чего он оказывает неодинаковое воздействие на обмен веществ, на продуктивность и качество урожая возделываемых культур [Соколов, 1937, 1974].

В процессе роста растения ячмень лучше использует азот удобрения из пахотного слоя чернозема типичного (Курская обл.) (табл. 91). В период молочно-восковой спелости большее количество азота удобрения ячмень использовал с глубины 60 см дерново-подзолистой почвы, хотя в целом по всему профилю из черноземной почвы (39 и 42% соответственно) [Руделёв, 1992].

Ячмень активно использовал азот с глубины 30 см и 60 см за счет лучшего потребления азота почвы, поскольку усвоение азота удобрения, начиная с глубины 60 см, снижалось (табл. 92). Существенно снижалось потребление азота удобрения и азота почвы с глубины 90 см. Особенность состоит в том, что растения использовали большее количество экстра-азота с глубины 60 см (19% от общего потребления азота растениями).

Таблица 91. Использование ячменем азота удобрения, внесенного на различную глубину дерново-подзолистой почвы и типичного чернозема, % от внесенной дозы [Руделёв, 1992]

| Вариант, глубина внесения | Фазы развития растений | | | | | |
|--|------------------------|-----|----------------------------|------|---------------------------|------|
| | кущение | | выход в трубку – колошение | | молочно-восковая спелость | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| P ₆₀ K ₆₀ + N ₆₀ на 30 см | - | 1,9 | 4,6 | 10,8 | 48,9 | 47,3 |
| P ₆₀ K ₆₀ + N ₆₀ на 60 см | - | 0,1 | 2,3 | 5,4 | 60,6 | 41,6 |
| P ₆₀ K ₆₀ + N ₆₀ на 90 см | - | - | 0,2 | 3,1 | 9,2 | 36,9 |

* 1 – дерново-подзолистая почва; 2 – чернозем выщелоченный.

Таблица 92. Потребление и использование ячменем азота удобрения и азота почвы в зависимости от глубины внесения азотных удобрений [Руделёв, 1992]

| Вариант, глубина внесения | Общий вынос азота, мг/дел | В том числе азот удобрения | | В том числе азот почвы | | |
|--|---------------------------|----------------------------|-----------------|------------------------|-------------|--------------------|
| | | мг/дел | % от внесенного | общий, мг/дел | экстра-азот | |
| | | | | | мг/дел | % от общего выноса |
| P ₆₀ K ₆₀ + фон | 2309 | - | - | 2309 | - | - |
| P ₆₀ K ₆₀ + N ₆₀ на 30 см | 3491 | 652 | 43,5 | 2839 | 533 | 15 |
| P ₆₀ K ₆₀ + N ₆₀ на 60 см | 3468 | 495 | 33,0 | 2973 | 664 | 19 |
| P ₆₀ K ₆₀ + N ₆₀ на 90 см | 2990 | 219 | 14,6 | 2771 | 462 | 15 |

При размещении азотных удобрений (меченных ¹⁵N) по почвенному профилю (10-100 см) выщелоченного чернозема яровая пшеница в засушливый год лучше использовала азот из глубоких слоев [Ткаченко, Пирогов, 1988]. В засушливый период более доступным для растений становится азот подпахотных менее иссушенных слоев, поскольку в пахотном слое азот остается менее доступным для корней растений.

Наибольшее количество азота удобрения яровая пшеница (лугово-черноземная почва, Курганская обл.) потребляла и использовала при внесении натриевой селитры на глубину 30 см (табл. 93). Что касается лучшего использования растениями азота натриевой селитры (32% от внесенного) при ее внесении на глубину 60 см по сравнению с сульфатом аммония (20%), то это, по-видимому, связано с тем, что нитраты служили донором кислорода для корней яровой пшеницы, выращиваемой на тяжелоуглинистой почве. При внесении удобрений (Na и Nc) на глубину 90 см растения использовали одинаковое количество азота удобрения (4% от применяемой дозы). При внесении натриевой селитры значительно усиливалась мобилизация азота почвы в глубоких слоях почвенного профиля. При этом мобилизовалось азота почвы больше, чем при внесении сульфата аммония.

Таблица 93. Использование яровой пшеницей азота удобрения и азота почвы в зависимости от глубины и формы азотных удобрений [Овсянников, 1991]

| Вариант | | Общий вынос азота, г/дел | Азот удобрения, г/дел | Азот почвы | | КИУ, % |
|---------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------|---------------|--------|
| форма удобрения | глубина внесения, см | | | общий, г/дел | экстра, г/дел | |
| P_{60} – фон | - | 1,65 | - | 1,65 | - | - |
| Фон + $^{15}N_{80}$ | 0-10 | 2,13 | 0,66 | 1,47 | нет | 33,0 |
| | 30 | 2,62 | 0,71 | 1,91 | 0,27 | 35,5 |
| | 60 | 2,12 | 0,41 | 1,71 | 0,06 | 20,5 |
| | 90 | 1,87 | 0,09 | 1,79 | 0,13 | 4,0 |
| Фон + $^{15}N_{80}$ | 0-10 | 2,40 | 0,71 | 1,66 | 0,01 | 37,0 |
| | 30 | 2,62 | 0,77 | 1,85 | 0,20 | 38,3 |
| | 60 | 2,74 | 0,65 | 2,09 | 0,43 | 32,3 |
| | 90 | 2,23 | 0,08 | 2,16 | 0,51 | 4,0 |

Таблица 94. Баланс азота натриевой селитры при весеннем внесении на разные глубины почвенного профиля под сахарную свеклу, % от внесенной дозы [Лукин, 1992]

| Показатель | Глубина внесения натриевой селитры, см | | | |
|--|--|-------|-------|--------|
| | 0-25 | 26-50 | 51-75 | 76-100 |
| Использовано свеклой | 52,7 | 57,5 | 59,8 | 65,5 |
| Потери | 21,3 | 15,6 | 14,9 | 13,6 |
| Обнаружено в почве (слой 0-150 см) | 26,0 | 26,9 | 25,3 | 20,9 |
| в том числе по слоям почвенного профиля: | | | | |
| 0-25 | 15,1 | 9,5 | 10,1 | 6,4 |
| 26-50 | 4,7 | 7,3 | 3,7 | 3,5 |
| 51-75 | 2,6 | 4,3 | 4,9 | 2,5 |
| 76-100 | 2,6 | 4,4 | 3,8 | 4,2 |
| 101-125 | 0,5 | 0,9 | 2,3 | 2,6 |
| 126-150 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,7 |

При выращивании на черноземе типичном (Белгородская обл.) сахарная свекла использует большее количество азота удобрения (на 5-13%) с глубоких слоев почвенного профиля (табл. 94). Особенность состоит в том, что при внесении натриевой селитры в глубокие слои азот мигрировал в верхние слои, что, по-видимому, связано с режимом влажности почвы в период вегетации сахарной свеклы. При весеннем внесении азотного удобрения сахарная свекла использовала на 22% больше, чем при осеннем их применении. Потери азота при этом снижались на 26% [Лукин, 1992]. При внесении N-удобрений в глубокие слои почвы потери азота удобрения снижались с 21 до 14%.

Таким образом, яровые зерновые (яровая пшеница, ячмень и сахарная свекла) при выращивании их на черноземных почвах использовали меньшее количество азота удобрения с глубоких слоев почвенного профиля (рис. 5). В ряде случаев яровая пшеница использует азот удобрения лучше из слоя 20-30 см по сравнению с пахотным слоем [Овсянников, 1991; Надежкина, 1994]. При внесении аммонийной формы удобрения использование азота с глубиной постоянно снижалось. В последствии яровая пшеница исполь-

зовала 3-5% азота удобрения независимо от глубины внесения удобрений. При выращивании яровой пшеницы иммобилизация азота удобрения снижалась в слое 20-30 см, а затем резко возрастала, тогда как при выращивании сахарной свеклы – постоянно снижалась по мере увеличения глубины внесения азотных удобрений.

Потери азота удобрения возрастают при внесении натриевой селитры на глубину чернозема типичного при выращивании сахарной свеклы [Лукин, 1992]. Значительные потери азота удобрения при внесении натриевой селитры в глубокие слои почвы вызвано усилением процессов динитрификации, при которых микроорганизмы в качестве донора кислорода использовали NO_3^- , поскольку их миграция отсутствовала из-за тяжелого гранулометрического состава почвы. При выращивании яровой пшеницы на выщелоченном черноземе (Пензенская обл.) потери азота сульфата аммония (меченый ^{15}N) возрастали до 27% (от применяемой дозы) при внесении удобрения на глубину 30 см [Надежкина, Лебедева, 2003]. С увеличением глубины внесения удобрения потери азота снижались до 16% в связи с тем, что возрастала иммобилизация азота вследствие усиления фиксации NH_4^+ глинистыми минералами [Могилевкина, 1964; Шилова, 1969, 1988; Королева, 1988].

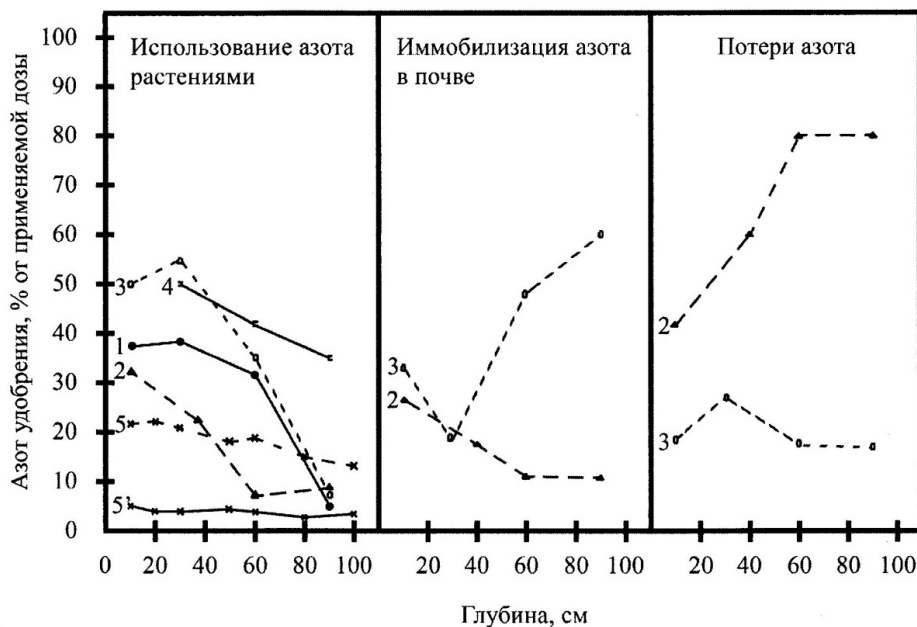


Рисунок 5. Баланс азота удобрения при внесении азотных удобрений на различную глубину почвенного профиля черноземов

1 – яровая пшеница [Овсянников, 1991]; 2 – сахарная свекла [Лукин, 1992]; 3 – яровая пшеница [Надежкина, 1994]; 4 – ячмень [Руделёв, 1992]; 5 – яровая пшеница [Ткаченко, Пирогова, 1988]; 5 – яровая пшеница (последействие) [Ткаченко, Пирогова, 1988].

3.8. Эффективность применения азотных удобрений на черноземных почвах

За счет естественного плодородия черноземы могут обеспечить получение урожая 12-14 ц/га зерна зерновых культур. Создавая с помощью азотных удобрений направленные потоки азота в системе почва-растение, представляется возможность регулировать продукционный процесс возделываемых культур. Эффективность применения азотных удобрений необходимо рассматривать конкретно отдельно для каждой культуры, поскольку не только вид, но и сорт отличаются специфическими признаками азотного питания в ходе онтогенетического развития [Гамзикова, 1994; Сычев и др., 2012; Гамзиков, 2013; Завалин, Соколов, 2016].

Озимая пшеница. В засушливый год азотные удобрения (N_{90}), внесенные осенью, повышали урожай зерна озимой пшеницы (чернозем типичный, Тамбовская обл.) сорта Московская 39 на 3,2 ц/га и на 4,4 ц/га у сорта Губернатор Дона [Иванова, 2013]. В благоприятный год сорт Губернатор Дона формировал такой же урожай зерна (49,1 ц/га) на контроле, как и сорт Московская 39 (48,2 ц/га) при применении азотных удобрений (90 кг/га осенью). В благоприятный год азотные удобрения повышали урожай зерна на 10,8 ц/га у обоих сортов.

Эффективность применения азотных удобрений существенно зависит от уровня плодородия почвы (табл. 95). Так, на выщелоченном черноземе (Белгородская обл.) в зависимости от предшественника создается определенный режим питательных веществ в почве [Доманов, 1995]. В фазу кущения озимой пшеницы в слое почвы 0-20 см накапливалось неодинаковое количество NO_3^- : черный пар – 68; кукуруза з/м – 54 и вика-овес – 51 мг/кг. Уровень накопления нитратов в почве определяет эффективность применения азотных удобрений. Максимальный урожай зерна озимая пшеница формировала по вико-овсяному предшественнику при внесении азотных удобрений в дозе 120 кг/га; тогда как по кукурузе з/м – при дозе азота 90 кг/га, а по черному пару – при дозе азота 60 кг/га.

Таблица 95. Эффективность применения азотных удобрений под озимую пшеницу

| Почва, регион | Урожайность на контроле (фонe) ц/га | Урожайность при внесении N удобрений ц/га | Эффективность азотных удобрений | | | | Источник |
|---|--|--|---------------------------------|----|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| | | | прибавка | | затраты N на 1 т продукции, кг | оплата 1 кг N прибавкой урожая, кг | |
| | | | ц/га | % | | | |
| Чернозем мощный, Краснодарский край | 45,4 | 49,0 | 3,6 | 8 | 36,5 | 2,0 | Голубцов, 1973 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | 36,3 | 39,2 | 2,9 | 8 | 36,0 | 2,0 | Минеев и др., 1980 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | 32,3 | 48,0 | 15,7 | 49 | 36,4 | 9,0 | Малюга, Тарасенко, 1985 |

| Почва, регион | Урожайность на контроле (фоне) | Урожайность при внесении N удобрений | Эффективность азотных удобрений | | | | Источник |
|---|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| | | | прибавка | | затраты N на 1 т продукции, кг | оплата 1 кг N прибавкой урожая, кг | |
| | | | ц/га | % | | | |
| ц/га | | | | | | | |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | 35,2 | 63,2 | 28,0 | 80 | 39,1 | 11,3 | Малюга, Тарасенко, 1985 |
| Чернозем выщелоченный, Воронежская обл. | 37,1 | 42,2 | 5,1 | 14 | 28,2 | 4,3 | Акулов, 1992 |
| Чернозем выщелоченный, Липецкая обл. | 34,1 | 40,2 | 6,1 | 20 | 29,1 | 5,1 | Акулов, 1992 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | 60,0 | 70,4 | 10,4 | 17 | 38,1 | 8,7 | Доманов, 1995 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | 36,5 | 41,0 | 4,5 | 12 | 31,6 | 9,6 | Коновалов, 1996 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | 35,1 | 51,8 | 16,7 | 48 | 36,4 | 8,9 | Богомазов, 1997 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | 42,1 | 43,7 | 1,6 | 4 | 35,5 | 1,1 | Ступаков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Поволжье | 38,1 | 41,5 | 3,4 | 9 | 31,9 | 2,6 | Сатаров, 1999 |
| Чернозем выщелоченный, Поволжье | 28,9 | 33,4 | 4,5 | 16 | 30,7 | 4,4 | Сатаров, 1999 |
| Чернозем выщелоченный, Самарская обл. | 19,5 | 28,7 | 9,2 | 47 | 27,2 | 11,8 | Шафран и др., 2008 |
| Чернозем выщелоченный, Тамбовская обл. | 34,2 | 45,3 | 11,1 | 32 | 32,8 | 5,7 | Юмашев, 2011 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | 28,2 | 36,0 | 7,8 | 28 | 33,1 | 4,7 | Иванова, 2013 |
| Среднее | - | - | 9,2 | 27 | 33,4 | 6,3 | - |

Озимая пшеница без удобрений по пару формирует урожайность зерна 38,1 ц/га (чернозем выщелоченный, Поволжье), тогда как по гороху – 28,9 ц/га. Наибольший урожай (41,5 ц/га) озимая пшеница формирует по пару при подкормке азотными удобрениями (N_{60}); по гороху и при подкормке (N_{90}) – 33,4 ц/га [Сатаров, 1999].

При выращивании озимой пшеницы по различным предшественникам в десятипольном зернопропашном севообороте (чернозем выщелоченный, Краснодарский край) внесение азотных удобрений (50-200 кг N/га) повышало урожай зерна в благоприятном году на 28 ц/га, в неблагоприятном году – на 15,7 ц/га [Малюга, Тарасенко, 1985].

Таким образом, применение азотных удобрений в среднем повышает урожайность зерна озимой пшеницы на 9,2 ц/га (27%), при затратах 33,4 кг N/т зерна и окупаемости 1 кг азота 6,3 кг зерна.

Яровая пшеница. На почвах ЦЧР применение азотных удобрений обеспечивает получение дополнительно 11,3 ц/га зерна яровой пшеницы (табл. 96). Наибольший урожай зерна (52,8 ц/га) яровая пшеница формировала на выщелоченном черноземе (Тульская обл.) при внесении азотных удо-

брений (60 кг/га) [Бровкин, 2000]. Наибольшей эффективностью азотные удобрения обладают при выращивании яровой пшеницы на выщелоченном черноземе Курской и Липецкой областей (прибавка урожая зерна 58 и 31% соответственно). При этом получена высокая оплата 1 кг азота прибавкой урожая зерна (7,7 и 7,1 кг).

При выращивании яровой пшеницы на выщелоченных малогумусных черноземах (Красноярский край) урожай зерна по фону ($P_{60}K_{60}$) после зернового предшественника составил 10,1 ц/га, тогда как по пару – 29,9 ц/га [Танделов, 1990]. При внесении удобрений в дозе 90 кг N/га прибавка урожайности зерна достигала 6,7 ц/га по зерновому предшественнику и 2,9 ц/га – по пару.

Таблица 96. Эффективность применения азотных удобрений под яровую пшеницу

| Почва, регион | Урожайность на контроле (фоне) | Урожайность при внесении N удобрений | Эффективность азотных удобрений | | | | Источник |
|--|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | | | прибавка | | затраты N на 1 т продукции, кг | оплата 1 кг N прибавкой урожая, кг | |
| | | | ц/га | % | | | |
| Чернозем мощный, Красноярский край | 19,9 | 27,1 | 7,2 | 36 | 40,0 | 6,7 | Беспалов, Гринберг, 1982 |
| Чернозем выщелоченный, Татарстан | 22,3 | 25,9 | 3,6 | 16 | 38,7 | 3,6 | Ломачко и др., 1982 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | 23,1 | 28,5 | 5,4 | 23 | 38,7 | 4,6 | Щербаков, Рудай, 1983 |
| Чернозем выщелоченный, Омская обл. | 17,4 | 18,9 | 1,5 | 9 | 30,7 | 2,6 | Кочергин, 1984 |
| Чернозем выщелоченный, Омская обл. | 33,2 | 38,2 | 5,0 | 15 | 35,5 | 3,7 | Кочергин, 1984 |
| Лугово-черноземовидная, Амурская обл. | 17,6 | 19,4 | 1,8 | 10 | 28,7 | 3,2 | Герасценко, Кузьмин, 1990 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | 24,1 | 29,8 | 5,7 | 24 | 38,9 | 4,9 | Акулов, 1992 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | 19,5 | 30,8 | 11,3 | 58 | 48,1 | 7,7 | Ступаков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Красноярский край | 29,9 | 32,8 | 2,9 | 10 | 38,9 | 2,3 | Танделов, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Поволжье | 26,7 | 37,8 | 11,1 | 42 | 39,4 | 7,4 | Сатаров, 1999 |
| Чернозем выщелоченный, Поволжье | 30,3 | 41,0 | 10,7 | 35 | 40,4 | 6,4 | Сатаров, 1999 |
| Чернозем выщелоченный, Липецкая обл. | 21,4 | 28,0 | 6,6 | 31 | 40,7 | 7,1 | Макаров, Архипов, 2001 |
| Чернозем выщелоченный, Курганская обл. | 18,4 | 27,2 | 8,8 | 49 | 37,9 | 8,5 | Немченко, Рябина, 2007 |
| Чернозем южный, Ростовская обл. | 17,8 | 21,4 | 3,6 | 20 | 36,6 | 4,6 | Агафонов, Олейников, 2008 |

Озимая рожь. На сильновыщелоченном черноземе (Тульская обл.) аммиачная селитра (40 и 80 кг N/га) не оказывала существенного влияния на продуктивность озимой ржи [Бровкин, Синягина, 1982]. Урожайность озимой ржи снижалась на 3 ц/га (по сравнению с фоном $P_{80}K_{80}$) при внесении высокой дозы аммиачной селитры (120 кг N/га). Однако в четвертой ротации севооборота продуктивность озимой ржи (на фоне $P_{80}K_{80}$) повышалась до 33 ц/га, а при внесении аммиачной селитры ее продуктивность возрастала на 9,9 ц/га (29%) (табл. 97). При этом оплата 1 кг азота прибавкой урожая зерна достигала 6,6 кг.

Озимая рожь в ЦЧР формирует урожаи зерна 34-41 ц/га в севообороте (на фоне фосфорных и калийных удобрений), т.е. такие урожаи зерна, какие получают в условиях Нечерноземной зоны при внесении азотных удобрений. Наибольшая прибавка урожая зерна получена на типичном черноземе (Белгородская обл.) – 12,3 ц/га (36%). При этом оказалась самой высокой оплата 1 кг азота прибавкой урожая – 6,9 кг зерна. При возделывании озимой ржи на типичном и выщелоченном черноземе других областей Черноземной зоны эффективность применения азотных удобрений изменяется от 3 до 5 ц/га (12-15%). Для формирования 1 т зерна озимая рожь в этих условиях использовала 31-39 кг азота.

Таблица 97. Эффективность применения азотных удобрений под озимую рожь

| Почва, область | Урожайность на контроле (фоне) | Урожайность при внесении N удобрений | Эффективность азотных удобрений | | | | Источник |
|--|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | | | прибавка | | затраты N на 1 т продукции, кг | оплата 1 кг N прибавкой урожая, кг | |
| | | | ц/га | % | | | |
| Чернозем выщелоченный, Тульская обл. | 33,9 | 43,8 | 9,9 | 34,0 | 6,6 | | Бровкин, Синягин, 1982 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | 41,0 | 46,0 | 5,0 | 12 | 36,9 | 2,9 | Щербаков, Рудай, 1983 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | 33,9 | 46,2 | 12,3 | 36 | 38,6 | 6,9 | Акулов, 1992 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | 35,1 | 39,3 | 4,2 | 12 | 31,3 | 3,4 | Руделёв, 1992 |
| Чернозем выщелоченный, Тамбовская обл. | 30,7 | 35,4 | 4,7 | 15 | 31,9 | 4,2 | Ступаков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Липецкая обл. | 20,6 | 23,6 | 3,0 | 14 | 34,6 | 3,6 | Макаров, Архипов, 2001 |
| Среднее | - | - | 6,5 | 20 | 34,6 | 4,6 | - |

Ячмень. В засушливых условиях (ГТК 0,50) прибавка урожая зерна от азотных удобрений (чернозем выщелоченный, Белгородская обл.) состави-

ла 1,1-3,6 ц/га; при высокой влагообеспеченности – 9,4-11,0 ц/га, т.е. в благоприятные по погодным условиям годы эффективность азотных удобрений возрастала в 3-10 раз.

В условиях выщелоченного чернозема (Курская обл.) наибольшей эффективностью отличались азотные удобрения – прибавка урожая зерна достигала 14,8 ц/га по отношению к фону [Акулов, 1992]. При формировании урожая зерна 44,9 ц/га ячмень тратил минимальное количество азота (22,9 кг N/т) на 1 т зерна и оплата 1 кг азота прибавкой урожая зерна составила почти 15 кг зерна (табл. 98).

Овес. В условиях сильновыщелоченных черноземов (Тульская обл.) из 4-х лет только в одном применении аммиачной селитры обеспечивало повышение урожая зерна овса (сорт Астор) на 5,2 ц/га (табл. 99). Повышенное количество осадков в течение первых трех лет приводило к полеганию растений овса [Бровкин, Синягин, 1982]. При внесении удобрений в высоких дозах (120 кг N/га) урожайность овса снижалась на 12,9-15,5 ц/га в зависимости от погодных условий года. В засушливый год продуктивность овса повышалась на 4,2 ц/га при внесении аммиачной селитры (80 кг N/га).

Овес формировал достаточно высокие урожаи зерна (20-29 ц/га) на черноземах ЦЧР на фоне фосфорных и калийных удобрений. При внесении азотных удобрений урожайность зерна овса повышалась на 4,3-7,7 ц/га (21-30% по отношению к фону). При затратах азота 35-39 кг/т зерна дополнительно получали 5-6 кг зерна на 1 кг азота.

Таблица 98. Эффективность применения азотных удобрений под ячмень

| Почва, область | Урожайность на контроле (фоне) ц/га | Урожайность при внесении N удобрений ц/га | Эффективность азотных удобрений | | | | Источник |
|--|--|--|---------------------------------|----|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| | | | Прибавка | | Затраты N на 1 т продукции, кг | Оплата 1 кг N прибавкой урожая, кг | |
| | | | ц/га | % | | | |
| Чернозем выщелоченный, Красноярский край | 18,3 | 28,3 | 10,0 | 55 | 30,1 | 11,8 | Беспалов, Гринберг, 1982 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | 23,6 | 29,7 | 6,1 | 26 | 30,6 | 6,7 | Минеев и др., 1983 |
| Чернозем выщелоченный, Липецкая обл. | 34,2 | 44,2 | 10,0 | 29 | 24,7 | 9,2 | Акулов, 1992 |
| Чернозем выщелоченный, Курская обл. | 30,1 | 44,9 | 14,8 | 49 | 22,9 | 14,8 | Акулов, 1992 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | 29,1 | 33,0 | 3,9 | 13 | 28,4 | 4,1 | Коновалов, 1996 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | 29,5 | 36,2 | 6,7 | 23 | 25,2 | 7,3 | Богомазов и др., 1997 |
| Чернозем выщелоченный, Тульская обл. | 36,3 | 50,0 | 13,7 | 38 | 30,1 | 9,1 | Бровкин, 2000 |
| Среднее | - | - | 9,0 | 32 | 27,0 | 8,9 | - |

Таблица 99. Эффективность применения азотных удобрений под овес

| Почва, область | Урожайность на контроле (фонe) | Урожайность при внесении N удобрений | Эффективность азотных удобрений | | | | Источник |
|---|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----|--------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | | | прибавка | | затраты N на 1 т продукции, кг | оплата 1 кг N прибавкой урожая, кг | |
| | | | ц/га | % | | | |
| Чернозем выщелоченный, Тульская обл. | 35,2 | 47,7 | 12,5 | 36 | 34,6 | 7,6 | Бровкин, 1982 |
| Чернозем выщелоченный, Тамбовская обл. | 27,1 | 34,7 | 7,6 | 28 | 35,3 | 6,1 | Федоров, 1990 |
| Чернозем слабовыщелоченный, тульская обл. | 39,0 | 40,3 | 1,3 | 3 | 35,6 | 0,9 | Потапов, 1996 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | 20,1 | 24,4 | 4,3 | 21 | 34,9 | 5,0 | Акулов, 1992 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | 25,7 | 33,5 | 5,9 | 30 | 36,4 | 6,0 | Богомазов, 1994 |
| Чернозем выщелоченный, Липецкая обл. | 29,4 | 37,1 | 7,7 | 26 | 38,5 | 5,4 | Макаров, Архипов, 2001 |
| Среднее | - | - | 6,6 | 24 | 35,9 | 5,2 | - |

Картофель. При выращивании картофеля на черноземных почвах урожайность клубней при внесении азотных удобрений колеблется в пределах 158-313 ц/га (табл. 100), при этом она повышалась на 28 ц/га (12% к контролю).

При выращивании картофеля на черноземе оподзоленном (Новосибирская обл.) при локальном внесении азотных удобрений (30 кг N/га) урожайность клубней больше на 38 ц/га (14%) по сравнению с разбросным их применением в той же дозе [Назарюк, 2007]. При внесении удобрений в дозе 60 кг N/га картофель формировал одинаковый урожай клубней (301-302 ц/га) при обоих способах их применения.

Сахарная свекла. Основным регионом выращивания сахарной свеклы в России (свыше 50%) является Центрально-Черноземная зона, где преобладают черноземы типичные, выщелоченные, обыкновенные. Несмотря на высокий уровень плодородия этих почв, применение удобрений под сахарную свеклу является высокоэффективным приемом [Каштанов, Явтушенко, 1997; Еськов и др., 1984; Воронин, 1997; Кутняк, 1997; Никитин, 1998; Куликова и др., 2007; Ванин и др., 2008].

Сахарная свекла формировала максимальный урожай корнеплодов (500 ц/га) при выращивании ее на выщелоченном черноземе (Липецкая обл.) и при весеннем применении КАС (180 кг N/га), что превышало урожайность на фоне ($P_{50}K_{100}$) на 44% [Воронин, 1997]. На выщелоченном черноземе (Орловская обл.) урожайность корнеплодов 440 ц/га получена при внесении КАС (150 кг N/га) (табл.101).

Таблица 100. Эффективность применения азотных удобрений под картофель

| Почва, область | Урожайность на контроле (фоне), ц/га | Урожайность при внесении азотных удобрений, ц/га | Эффективность азотных удобрений | | | | Источник |
|---|--------------------------------------|--|---------------------------------|----|--------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| | | | прибавка | | затраты N на 1 т продукции, кг | Оплата 1 кг N прибавкой урожая, кг | |
| | ц/га | % | ц/га | % | | | |
| Чернозем выщелоченный, Воронежская обл. | 279 | 291 | 12 | 4 | 8,3 | 5,0 | Минеев и др., 1975 |
| Чернозем выщелоченный, Красноярский край | 142 | 158 | 16 | 11 | 4,0 | 25,4 | Танделов, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | 262 | 313 | 51 | 19 | 8,4 | 19,4 | Назарюк, 2007 |
| Чернозем типичный, Новосибирская обл. | 217 | 249 | 32 | 15 | 8,1 | 15,8 | Назарюк, 2007 |
| Среднее | - | - | 28 | 12 | 7,2 | 10,9 | - |

Таблица 101. Эффективность применения азотных удобрений под сахарную свеклу

| Почва, область | Урожайность на контроле (фоне), ц/га | Урожайность при внесении азотных удобрений, ц/га | Эффективность азотных удобрений | | | | Источник |
|--|--------------------------------------|--|---------------------------------|----|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | | | прибавка | | затраты N на 1 т продукции, кг | оплата 1 кг N прибавкой урожая, кг | |
| | ц/га | % | ц/га | % | | | |
| Чернозем мощный выщелоченный, Курская обл. | 438 | 466 | 28 | 6 | 5,6 | 10,7 | Сивак, Марченко, 1973 |
| Чернозем обыкновенный, Белгородская обл. | 249 | 270 | 21 | 8 | 3,7 | 21,0 | Кильчевский, Суворов, 1976 |
| Чернозем выщелоченный, Воронежская обл. | 340 | 376 | 36 | 10 | 5,1 | 18,8 | Мазепин, Красных, 1977 |
| Чернозем слабовыщелоченный, Воронежская обл. | 303 | 377 | 74 | 24 | 5,3 | 61,7 | Еськов и др., 1984 |
| Чернозем выщелоченный, Краснодарский край | 537 | 555 | 18 | 3 | 6,3 | 5,1 | Кутняк, 1997 |
| Чернозем выщелоченный, Орловская обл. | 312 | 440 | 128 | 41 | 5,5 | 52,9 | Воронин, 1997 |
| Чернозем выщелоченный, Липецкая обл. | 346 | 500 | 154 | 44 | 6,0 | 51,3 | Воронин, 1997 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | 435 | 479 | 44 | 10 | 5,7 | 16,1 | Никитин, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Тульская обл. | 321 | 406 | 85 | 26 | 5,0 | 41,9 | Бровкин, 1999 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | 303 | 418 | 115 | 38 | 5,4 | 50,9 | Макаров, Архипова, 2001 |
| Чернозем выщелоченный, Ульяновская обл. | 358 | 418 | 60 | 17 | 5,4 | 26,5 | Куликова и др., 2007 |
| Чернозем типичный, Курская обл. | 274 | 294 | 20 | 7 | 4,2 | 16,3 | Ванин и др., 2008 |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | 257 | 392 | 135 | 53 | 5,3 | 19,6 | Юмашев, 2011 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | 245 | 361 | 116 | 47 | 4,9 | 43,0 | Ильющенко, 2015 |
| Среднее | - | - | 74 | 24 | 5,2 | 31,1 | - |

В условиях типичного чернозема (Белгородская обл.) наибольшей эффективностью отличалась аммиачная селитра (240 кг N/га) на фоне без навоза и в дозе 120 кг N/га на фоне 40 т/га навоза [Никитин, 1998]. При этом прибавка урожайности составила 44 ц/га (10%) по отношению к фону. Примерно такой же эффективностью характеризовались азотные удобрения при выращивании сахарной свеклы на выщелоченном черноземе (Воронежская обл.) [Мазепин, Красных, 1977]. Фактором, ограничивающим эффективность азотных удобрений в ЦЧР, является дефицит доступной влаги в корнеобитаемом слое почвы. При внесении аммиачной селитры (80 кг N/га) сахарная свекла формирует урожай корнеплодов 400 ц/га (прибавка к фону 45 ц/га), а в засушливый год – лишь 208 ц/га (прибавка к фону 17 ц/га).

Таким образом, применение азотных удобрений под сельскохозяйственные культуры на черноземных почвах различных регионов России является высокоэффективным приемом, позволяющим существенно повысить их продуктивность. Эффективность применения азотных удобрений под зерновые культуры составляет 20-32%, под картофель – 12%, под сахарную свеклу – 24%.

Глава 4. Экологические аспекты потоков азота на черноземах

Экологическое направление является приоритетным в теории и практике современной агрохимии. Для него свойственно смещение акцентов в круге решаемых агрохимией задач, видоизменение традиционных и установление новых приоритетов, расширение числа критериев, по которым оценивается эффективность применяемых удобрений и других химических средств [Соколов, Семенов, 1994; Сычев и др., 2012, Завалин, Соколов, 2016]. Ключевым средством решения этих задач является создание для растений комфортных условий почвенной среды и осуществление с помощью удобрений таких типов регуляции режима минерального питания, при которых обеспечивается максимальное включение азота в продукционный процесс и достигается адаптация динамики поступления азота в растение к динамике реальной физиологической потребности растительного организма в этом элементе питания. Оптимизация азотного питания растений тесно связана с решением ряда агроэкологических проблем: снижение газообразных потерь азота в системе удобрение-почва-растение, снижение аккумуляции нитратов в продукции и в природных водах. Эффективное использование азота удобрения растениями играет определяющую роль в сохранении почвенного плодородия и получении экологически безопасной продукции.

4.1. Участие микроорганизмов в формировании плодородия и экологической функции черноземных почв

Черноземные почвы – сложные многокомпонентные образования с высокой степенью пространственно-временной изменчивости, которую определяют структурно-функциональная изменчивость микробных обществ. Максимальное количество микробной биомассы накапливается в тех горизонтах, где велика численность грибов (черноземы) или большая доля горизонта В2 (дерново-подзолистые почвы) (табл. 102).

Содержание микробной биомассы является показателем экологического состояния черноземных почв, тесно связанным с величиной антропогенного воздействия [Олдак, 1983; Звягинцев, 1987; Добровольский, Умаров, 2003]. Этот показатель возможно использовать в качестве оценки экологического состояния почв.

Таблица 102. Запасы микробной биомассы в черноземе обыкновенном и дерново-подзолистой почве [Добровольская и др., 2015]

| Микробная биомасса | Почва | |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| | чернозем обыкновенный | дерново-подзолистая |
| Общая биомасса | 15123 | 13946 |
| Бактерии | 421/2,8 | 195/1,4 |
| Мицелий актиномицетов | 66/0,4 | 27/0,2 |
| Мицелий грибов | 13282/87,8 | 11914/85,4 |
| Споры грибов | 1353/9,0 | 1811/13,0 |

* Числитель – кг/га; знаменатель – % от общей биомассы.

Черноземные почвы имеют свой набор микробиоценозов, свой состав трансформируемых веществ и свой предел устойчивости. Экологические функции почвенных микроорганизмов разнообразны и входят в каждую из 16 типов биогеоценологических функций почв [Звягинцев и др., 1992, 2003].

Почвенные микроорганизмы обладают мощным ферментативным аппаратом, выполняют многообразные функции и участвуют в круговороте веществ, способствуют повышению плодородия почвы, обеспечивая устойчивое функционирование экосистем [Мишустин, 1976; Звягинцев, 1987].

Установлено, что на черноземных почвах (Каменная Степь, Воронежская обл.) филогенетическое разнообразие мало зависит от дозы применяемых удобрений и типа землепользования [Чернов и др., 2015]. Длительное применение минеральных удобрений не оказало существенного влияния на таксономическую структуру и разнообразие почвенного микробиоценоза.

При внесении полного минерального удобрения повышалось общее число микроорганизмов в слое почвы 0-10 см, увеличивалась доля аммонификаторов. В условиях чернозема типичного (Курская обл.) благодаря методу секвенирования гена 16S рРНК микроорганизмов установлено, что наибольшее количество прокариотной биомассы (бактерии, археи) и грибов сосредоточено во фракции частиц <0,25 мм и агрегатах размером 2-5 мм [Иванова и др., 2015]. Наибольшим разнообразием характеризуются фракции <0,25 и залежи 2-5 мм.

Микроорганизмы активно участвуют в формировании структурного состояния черноземов, благодаря которому развиваются процессы трансформации азотсодержащих и других соединений. Минеральные частицы почвы связываются с органическими веществами, продуцируемыми микроорганизмами, а также полисахаридами растительных остатков, образуя микроагрегаты, которые взаимодействуют друг с другом и формируют макроагрегаты [Шейн, Милановский, 2013; Романычева и др., 2013; Холодов, 2013].

Длительное использование (более 20 лет) чернозема типичного (Курская обл.) привело к снижению в 1,4-1,9 раза запасов микробной биомассы (МБ) в 50-сантиметровом слое почвы [Масютенко, Нагорная, 2007]. В ходе вегетации растений меняется содержание МБ в 20-сантиметровом слое почвы (табл. 103): возрастает от мая к июлю в лесополосе и залежи. В почве пашни севооборота и бессменного пара количество МБ снижается в июне и несколько возрастает в июле. В августе количество МБ снижается на всех угодьях.

Наибольшее количество МБ на 1 г гумуса приходилось в почве лесополосы и залежи (табл. 104). В почве севооборота и бессменного пара биогенность гумуса снижалась на 23 и 52% соответственно. Количество МБ в лабильных гумусовых веществах (ЛГВ) также снижалось на 7% и 41%.

Таблица 103. Динамика содержания углерода микробной биомассы, мг/кг [Масютенко, Нагорная, 2007]

| Угодье | Май | Июнь | Июль | Август |
|------------------------------|------|------|------|--------|
| Лесополоса | 1140 | 1220 | 1340 | 1170 |
| Залежь | 1000 | 1080 | 1170 | 1110 |
| Пашня – севооборот (гречиха) | 940 | 710 | 890 | 490 |
| Пашня – бессм. пар | 710 | 600 | 620 | 470 |
| НСР0,95 | 48 | 66 | 65 | 62 |

Таблица 104. Количество микробной биомассы, мг/г гумусовых веществ чернозема [Масютенко, Нагорная, 2007]

| Угодье | Глубина, см | Гумус | | | ЛГВ | | |
|-------------------|-------------|-------------|---------------|------------------|------|------|------|
| | | 2004 | 2005 | 2006 | 2004 | 2005 | 2006 |
| Лесополоса | 0-20 | 38 | 39 | 37 | 333 | 301 | 280 |
| Залежь | 0-20 | 37 | 39 | 37 | 362 | 338 | 304 |
| Пашня-севооборот | 0-20 | 31 ячень | 21 гречиха | 26 чистый пар | 338 | 209 | 252 |
| Пашня, бессм. пар | 0-20 | 25 | 22 | 26 | 256 | 301 | 391 |

Виды сельскохозяйственных культур и их порядок чередования в севооборотах оказывают многостороннее воздействие на сложные биохимические процессы, происходящие в почве. Корневые выделения и ПКО служат источником питания и энергии для почвенных микроорганизмов. В то же время почвенная микрофлора формирует условия для развития растений. Участвуя в процессах минерализации и иммобилизации, микроорганизмы изменяют доступность и потоки азота в почве и тем самым временно исключают часть его из сферы питания растений, препятствуя потерям в виде газообразных соединений [Благодатский и др., 1989; Каличкин, Малыгин, 2005, 2007]. Активность почвенной микрофлоры характеризует состояние почвы в конкретных условиях, т.е. содержание и запасы подвижных органических и неорганических соединений. По мере повышения плодородия лугово-черноземной почвы (Омская обл.) увеличивается численность олигонитрофилов, нитрификаторов и нитрификационная способность [Куликов, Хомова, 2004].

Таблица 105. Динамика запасов нитратов, содержания регидратационного аммония и углерода микробной биомассы в слое почвы 0-10 см [Малыгин и др., 2014]

| Предшественники ячменя | май | | | июнь | | | июль | | |
|----------------------------|--|--|----------|--|--|----------|--|--|----------|
| | N-NO ₃ ⁻ , кг/га | N-NH ₄ ⁺ , мг/кг | C, мг/кг | N-NO ₃ ⁻ , кг/га | N-NH ₄ ⁺ , мг/кг | C, мг/кг | N-NO ₃ ⁻ , кг/га | N-NH ₄ ⁺ , мг/кг | C, мг/кг |
| Пар-пшеница-пшеница | 7,6 | 18,0 | 380 | 5,0 | 19,6 | 390 | 2,3 | 17,4 | 453 |
| Клевер-озимая рожь-пшеница | 17,5 | 14,3 | 434 | 6,0 | 22,7 | 464 | 1,1 | 19,4 | 540 |

Характер чередования и состав культур в севообороте (чернозем выщелоченный, Новосибирская обл.) существенно влияют на активность микробоценозов в почве под ячменем (табл. 105). Клевер в севообороте способствует развитию микробной биомассы, накоплению нитратов и содержанию регидрационного аммония (аммоний микробных клеток) [Малыгин и др., 2014]. Запасы азота в микробной биомассе в большей степени зависят от метеоусловий и в меньшей – от типа севооборота. Так, повышение температуры в августе вызвало интенсивный рост микробной биомассы.

Под действием органических и минеральных удобрений возрастает интенсивность микробиологических процессов в почве. Наряду с положительным эффектом известно, что повышение активности почвенной микрофлоры приводит к усилению разложения органического вещества почвы и к снижению ее плодородия [Орлов, 1990; Паниткина, Ключева, 1995]. Одностороннее применение минеральных удобрений усиливает процессы микробиологического разложения органических веществ в почве. Недостаток свежего органического вещества стимулирует гетеротрофную часть почвенной биоты использовать углерод гумуса [Туев, 1989].

Количество и качество органического вещества определяют формирование микробной биомассы, соотношение грибов и бактерий в ней. Росту и развитию различных экологических групп микроорганизмов способствуют благоприятные агроэкологические факторы. В этих условиях преимущество получают микроорганизмы, стремящиеся к К-стратегии. У этой группы организмов высокое сродство ферментных систем к субстрату, обеспечивающее эффективный рост при меньших затратах энергии. В неблагоприятных условиях происходит частичная гибель менее приспособленных к новым условиям организмов. Преимущество получают виды, использующие r-стратегию, для которых характерна высокая скорость разложения.

В условиях 6-польного севооборота чернозем выщелоченный, Кабардино-Балкария) применение органических и минеральных удобрений (навоз 30 т/га, $N_{270}P_{280}K_{245}$ суммарная доза за ротацию) изменяло численность и разнообразие почвенного микробоценоза (табл. 106). Численность бактерий аммонификаторов в наибольшей степени возрастает при совместном внесении органических и минеральных удобрений. Несколько хуже они развиваются при внесении только минеральных удобрений. Максимального развития бактерии аммонификаторы (развивающиеся на мясо-пептонном агаре, МПА) достигали в июне, снижая их численность к концу лета, несколько увеличиваясь в сентябре.

Численность бактерий (развивающихся на крахмально-аммиачном агаре, КАА) превосходила количество аммонификаторов (рост на МПА) во все периоды вегетации. Численность бактерий, усваивающих минеральный азот (рост на КАА), превосходила количество бактерий, усваивающих органический азот (рост на МПА) в 1,5 раза [Джанаев и др., 2006]. Наибольшего развития бактерии (рост на КАА) достигали при внесении навоза и полного минерального удобрения.

Спорообразующие бактерии (бациллы) являются специфической экологической группой, характеризующей интенсивность процессов минерализации на более поздних стадиях их развития, поскольку связана с превращением более устойчивых органических соединений в почве.

Таблица 106. Численность микроорганизмов в слое 0-20 см чернозема выщелоченного в зависимости от системы удобрений, тыс./г сухой почвы [Джанаев и др., 2006]

| Вариант | Месяц | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|------|--------|----------|
| | май | июнь | июль | август | сентябрь |
| Общая численность бактерий на МПА | | | | | |
| Без удобрений | 2570 | 3120 | 2200 | 2130 | 2340 |
| NPK | 4560 | 5190 | 3370 | 2200 | 3510 |
| Навоз + NPK | 5000 | 7000 | 4460 | 4050 | 5480 |
| Общая численность бактерий на КАА | | | | | |
| Без удобрений | 3500 | 4550 | 3050 | 2860 | 3050 |
| NPK | 5510 | 7160 | 4610 | 3580 | 4920 |
| Навоз + NPK | 7520 | 11000 | 7840 | 6330 | 8400 |
| Спорообразующие бактерии | | | | | |
| Без удобрений | 333 | 361 | 337 | 543 | 409 |
| NPK | 385 | 405 | 536 | 751 | 546 |
| Навоз + NPK | 598 | 597 | 744 | 1061 | 860 |
| Актиномицеты | | | | | |
| Без удобрений | 848 | 1050 | 1030 | 1390 | 1100 |
| NPK | 966 | 1220 | 1200 | 1540 | 1330 |
| Навоз + NPK | 1300 | 1690 | 1550 | 1880 | 1760 |
| Грибы | | | | | |
| Без удобрений | 28 | 40 | 20 | 14 | 23 |
| NPK | 34 | 47 | 25 | 21 | 30 |
| Навоз + NPK | 50 | 61 | 36 | 25 | 43 |

Лучшего развития бациллы достигали под пропашными культурами севооборота. Минеральные удобрения (одинарная и двойная дозы) усиливали развитие бацилл. Однако от тройной дозы удобрений наступала депрессия их роста, что, по-видимому, связано с подкислением почвенной среды. Максимального развития бациллы достигали к концу лета. При этом менялся видовой состав бациллярного микробиоценоза: развивались виды, потребляющие органический азот.

Актиномицеты (лучистые грибы), благодаря наличию мощной протеолитической ферментативной системы, усваивают относительно сложные и мало доступные органические соединения. Своего максимума актиномицеты достигали при внесении органических и минеральных удобрений. При внесении тройной дозы минеральных удобрений рост актиномицетов приостанавливался. Численность актиномицетов увеличивалась от весны к концу лета.

Микроскопические грибы активно участвуют в формировании плодородия черноземов: разлагают растительные и животные остатки, синтезируют органические соединения, образовании комковатой структуры почвы. Органические и минеральные удобрения улучшают рост грибов. Своего максимума грибы достигали в июне, затем их численность снижалась к концу лета, немного повышалась в сентябре.

Способ внесения азотных удобрений оказывает неспецифическое действие на почвенную сапрофитную микрофлору (нарушение видового состава грибов) [Попов и др., 1990]. При локальном внесении мочевины численность аммонификаторов в очаге увеличивалась в 1,2-1,5 раза (табл. 107).

Таблица 107. Численность микроорганизмов различных экологотрофических групп (КОЕ), 16 суток после внесения удобрений, млн./г [Свистова и др., 2003]

| Вариант | Аммонификаторы | Иммобилизаторы азота | Олигонитрофилы | Актиномицеты | Грибы, x10-3 | Целлюлолитики, x10-3 |
|-------------------------------|----------------|----------------------|----------------|--------------|--------------|----------------------|
| Без внесения азота (контроль) | 6,9 | 10,2 | 16,8 | 0,75 | 64,7 | 47,3 |
| Мочевина | | | | | | |
| Вразброс | 6,7 | 12,4 | 19,1 | 0,60 | 65,3 | 65,0 |
| Локально (очаг) | 8,0 | 6,6 | 11,4 | 0,41 | 43,2 | 46,2 |
| Локально+КМП (очаг) | 15,7 | 8,9 | 17,3 | 0,70 | 50,0 | 67,7 |
| Сульфат аммония | | | | | | |
| Вразброс | 5,1 | 10,5 | 12,5 | 0,43 | 40,0 | 39,5 |
| Локально (очаг) | 8,2 | 5,3 | 10,7 | 0,40 | 37,3 | 48,8 |

Одновременно снижалась численность иммобилизаторов азота, олигонитрофилов, грибов и актиномицетов. Соотношение мицелиальных и бактериальных форм снизилось в 1,6-1,8 раза. Очаг сульфата активизировал повышение численности аммонификаторов и подавление других групп микроорганизмов. Сукцессионные изменения основных трофических групп микроорганизмов свидетельствуют о временных негативных тенденциях при локальном внесении азотных удобрений, поскольку снижалось связывание азота в микробной биомассе.

Система основной обработки почвы оказывает существенное влияние на активность почвенного микробоценоза. В условиях выщелоченного чернозема (Воронежская обл.) численность микроорганизмов росла от слоя 0-10 см к слоям 10-20 см и 20-30 см при отвальной вспашке под все культуры зерносвекловичного севооборота [Никульников и др., 2004]. При безотвальной системе обработки количество микроорганизмов в верхнем 10сантиметровом слое повышалось на 12-22% по сравнению с более глубокими слоями, что связано с локализацией пожнивно-корневых остатков и удобрений в этом слое. Значительное количество микроорганизмов накапливалось в пахотном слое при плоскорезной системе обработки почвы.

В пахотном слое доля олигозафилов доходила до 43%, их численность уменьшалась в июле, а к уборке урожая несколько возрастала совместно с ростом нитрификационной способности почвы. Количество олигозафилов преобладало в звене с травами по сравнению с паром. По численности олигозафилов системы обработки почвы располагались в убывающей последовательности: плоскорезная, комбинированная, отвальная со вспашкой под сахарную свеклу по схеме улучшенной зяби и полупара (табл. 108).

Таблица 108. Численность микроорганизмов, разлагающих сложные полимерные соединения [Никульников и др., 2004]

| Система обработки | Олигозаофилы | | | Целлюлозоразрушающие | | | Грибы, тыс. шт./г абсолютно сухой почвы | | |
|--|----------------------------------|------|----------|----------------------|------|----------|---|------|----------|
| | млн. шт./г абсолютно сухой почвы | | | | | | | | |
| | май | июль | сентябрь | май | июль | сентябрь | Май | июль | сентябрь |
| Черный пар-озимые-свекла | | | | | | | | | |
| Без удобрений | | | | | | | | | |
| Отвальная | 9,9 | 4,7 | 10,5 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 86 | 156 | 124 |
| Полупаровая | 6,8 | 6,2 | 13,0 | 0,6 | 0,5 | 1,4 | 83 | 165 | 114 |
| Безотвальная | 9,2 | 6,4 | 13,6 | 1,2 | 1,3 | 1,0 | 96 | 140 | 161 |
| Комбинированная | 9,1 | 6,0 | 10,1 | 0,7 | 0,5 | 0,8 | 106 | 100 | 130 |
| Навоз 50 т/га + N ₁₆₀ P ₁₈₀ K ₁₆₀ | | | | | | | | | |
| Отвальная | 11,1 | 10,6 | 11,8 | 0,9 | 0,9 | 1,4 | 189 | 173 | 170 |
| Полупаровая | 11,7 | 10,3 | 11,1 | 0,6 | 0,7 | 1,5 | 164 | 122 | 184 |
| Безотвальная | 10,7 | 14,3 | 10,9 | 0,9 | 0,4 | 1,3 | 296 | 235 | 153 |
| Комбинированная | 10,2 | 12,8 | 11,6 | 1,0 | 0,4 | 1,6 | 206 | 220 | 184 |

Таблица 109. Численность споровых, актиномицетов, фосфобактерий, млн. шт./г абсолютно сухой почвы [Никульников и др., 2004]

| Система обработки | Споровые | | | Актиномицеты | | |
|--|----------|------|----------|--------------|------|----------|
| | май | июль | сентябрь | май | июль | сентябрь |
| Черный пар-озимые-свекла | | | | | | |
| Без удобрений | | | | | | |
| Отвальная | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0,9 |
| Полупаровая | 0,4 | 0,8 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,8 |
| Безотвальная | 0,9 | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 1,2 |
| Комбинированная | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 0,6 | 1,1 | 1,8 |
| Навоз 50 т/га + N ₁₆₀ P ₁₈₀ K ₁₆₀ | | | | | | |
| Отвальная | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 0,6 | 0,9 | 0,7 |
| Полупаровая | 0,5 | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 1,1 |
| Безотвальная | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,9 | 1,8 |
| Комбинированная | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 1,9 |

Доля целлюлозоразлагающих микроорганизмов в пахотном слое составила 3,7% от населения микробоценоза; их численность снижалась в летний период и возрастала – в осенний. Численность целлюлозоразлагающих микроорганизмов возрастала при безотвальной обработке почвы.

Удельный вес микроскопических грибов в микробоценозе составлял 0,11%. Наибольшее количество грибов накапливалось в почве весной, затем снижалось летом и возрастало осенью. Плоскорезная и комбинированная обработки способствовали развитию грибов.

Доля численности споровых микроорганизмов составила 3,6% от общей численности микробоценоза. Наибольшее их количество накапливалось в июле, снижаясь к сентябрю. Применение органических и минеральных удо-

брений обогащало почву споровыми организмами, наибольшего развития они достигали при плоскорезной и комбинированной обработке почвы (табл. 109).

Доля участия актиномицетов в процессах трансформации азота в почве достигала 3,5-5,4% численности микробоценоза. Их количество постепенно росло к сентябрю. Удобрения и многолетние травы повышали численность актиномицетов в пахотном слое почвы. Не установлена численность этих микроорганизмов от систем основной обработки.

4.2. Потоки азота при водной эрозии черноземных почв

Процессы эрозии почв значительно активизировались во второй половине XX века вследствие интенсификации земледелия при неадекватной противо-эрозионной их защите. Основная доля деградации почвы (84%) приходится на водную эрозию и дефляцию. За последние 20 лет темп прироста эродированных земель в России достигают 6-7% каждые 5 лет, или до 1,5 млн. га ежегодно [Котлярова, Ягуткин, 2008].

«Эрозия выполняет по отношению к почве роль гильотины – она ее в буквальном смысле обезглавливает: лишает верхних гумусовых горизонтов, в которых сосредоточено почвенное плодородие».

И.А. Крупеников, 2008

В России эродированные почвы занимают пятую часть (20,0-21,1%) всей пашни – 26,7 млн. га, из них максимальные площади заняты слабосмытыми разностями [Кирюхина, Пацукевич, 2001]. Наибольшая их доля находится в лесостепной и степной зонах европейской территории страны, несмотря на то что серые лесные почвы и черноземы обладают водопрочной структурой и высокой устойчивостью к смыву [Сычев и др., 2012].

Черноземные почвы занимают 7% территории России, где проживает более 50% населения и производится более половины сельскохозяйственной продукции [Щербаков, 2000]. Это те территории, где сельскохозяйственные угодья (в том числе пашня) подвержены эрозии и дефляции: Поволжский (85-95%), Северо-Кавказский (92-98%), Центрально-Черноземный (53-56%), Уральский (59-67) регионы [Проблемы деградации..., 2008].

Наиболее опасны с экологической точки зрения процессы водной эрозии черноземных почв [Каштанов, Явтушенко, 1997]. В результате эрозионных воздействий с пашни за сезон теряется 15-90 т/га почвы, содержащей 1,5-6,0 т гумуса и 78-1400 кг азота [Гамзиков, 2013]. В России ежегодно смывается примерно 3 млрд. т почвы, а с твердым стоком выносятся около 10 млн. т азота. При этом большая часть смываемого азота находится в форме органических соединений.

Общая площадь эродированных земель в Ростовской области превышает 4,5 млн. га. В процессе смыва почвы пашня ежегодно теряет 54,2 тыс. т азота, что значительно больше того количества минеральных удобрений, которое применяется в области [Зеленский, 2007]. Вследствие эрозии наруша-

ется водный режим почвы, заиливаются реки; от большинства степных рек остались только названия, так как их русло заилено плодородной почвой.

Различная степень проявления эродированных процессов и неодинаковая интенсивность влияния климатических факторов обуславливают различия азотного режима почв по элементам рельефа. Результатом водной эрозии различных почв является снижение содержания не только общего азота, но и других его форм [Щербаков, Рудай, 1983; Руделёв, 1992; Шустрова, 2000; Проценко, Караулова, 2007]. Чернозем типичный слабоэродированный на северном склоне не уступает несмытому по содержанию общего азота. На склоне южной экспозиции среднеэродированный типичный чернозем содержит меньшее количество общего азота, чем несмытый. Наиболее обеспеченным азотом оказался склон северной экспозиции типичного чернозема (286-290 мг/100г почвы), тогда как на водораздельном плато и склоне южной экспозиции его содержание снижалось (272-277 и 267-272 мг/100г соответственно [Шустова, 2000]).

Уровень плодородия черноземов в эрозионном агроландшафте (состав и содержание азотсодержащих соединений) определяется направленностью склонов [Траутвах, 2000; Караулова, 2005; Проценко, Караулова, 2007; Сычев и др., 2012]. В почве пахотного слоя чернозема типичного (Курская обл.) склона южной экспозиции содержалось меньше гидролизуемого азота и больше азота негидролизуемой фракции по сравнению с склоном северной экспозиции (табл. 110). Органические удобрения в большей степени влияли на содержание минерального азота в почве южного склона, слабее действовали на его количество в почве плато и северного склона [Проценко, Караулова, 2007]. Минеральные удобрения повышали содержание легкогидролизуемого азота в почве южного склона, не влияли на его количество на остальных элементах рельефа. В почве южного склона складываются более благоприятные условия для использования богатого азотом органического вещества, в результате чего существенно (в 5 раз) растет нитрификационная способность (рис.6).

Таблица 110. Содержание форм азота по элементам рельефа в зависимости от удобрённости чернозема типичного, мг/100г почвы

| Дозы удобрений за ротацию | Минеральный | Гидролизуемый | | Негидролизуемый | Общий |
|---|-------------|---------------|--------|-----------------|-------|
| | | легко | трудно | | |
| Северный склон | | | | | |
| Без удобрений(контроль) | 3,3 | 15,5 | 38,8 | 166 | 224 |
| $N_{280}P_{300}K_{320}$ | 3,7 | 15,9 | 33,1 | 178 | 231 |
| Навоз 48 т/га | 3,2 | 17,2 | 35,4 | 175 | 231 |
| Навоз 48 т/га+ $N_{280}P_{300}K_{320}$ | 4,2 | 17,6 | 34,8 | 167 | 224 |
| В среднем | 3,6 | 16,6 | 35,5 | 172 | 228 |
| Водораздельное плато | | | | | |
| Без удобрений(контроль) | 3,3 | 14,6 | 42,0 | 180 | 240 |
| $N_{280}P_{300}K_{320}$ | 4,2 | 13,7 | 41,7 | 171 | 231 |
| Навоз 48 т/га | 3,7 | 17,4 | 36,4 | 183 | 240 |
| Навоз 48 т/га+ $N_{280}P_{300}K_{320}$ | 4,8 | 20,1 | 32,3 | 174 | 231 |
| В среднем | 4,0 | 16,5 | 38,1 | 177 | 236 |

| Дозы удобрений за ротацию | Минеральный | Гидролизующий | | Негидролизующий | Общий |
|---|-------------|---------------|--------|-----------------|-------|
| | | легко | трудно | | |
| Южный склон | | | | | |
| Без удобрений(контроль) | 2,9 | 13,3 | 35,1 | 180 | 231 |
| N ₂₈₀ P ₃₀₀ K ₃₂₀ | 4,1 | 15,2 | 28,2 | 176 | 224 |
| Навоз 48 т/га | 3,6 | 15,5 | 33,5 | 178 | 231 |
| Навоз 48 т/га+N ₂₈₀ P ₃₀₀ K ₃₂₀ | 4,0 | 14,8 | 35,6 | 177 | 231 |
| В среднем | 3,6 | 14,7 | 33,1 | 178 | 229 |

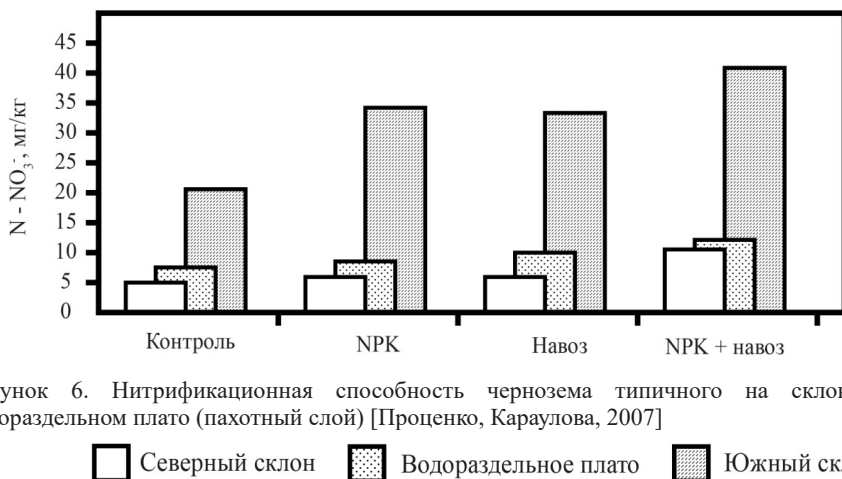


Рисунок 6. Нитрификационная способность чернозема типичного на склонах и водораздельном плато (пахотный слой) [Проценко, Караулова, 2007]

В черноземе целинного участка на водоразделе содержание нитратного азота выше, чем аммонийного азота (табл. 111). Однако на склонах, наоборот, больше аммонийного азота по сравнению с нитратами (чернозем типичный, «Казацкая степь», Курская обл.). При распашке целины преобладающей формой минерального азота становятся нитраты: их количество на водоразделе возрастает в 3 раза, северном склоне в 4 раза, южном склоне – в 10,2 раза по сравнению с целинной почвой. При этом общее количество минерального азота возрастает более чем в 2 раза [Каштанов, Явтушенко, 1997].

Таблица 111. Содержание минерального азота в черноземе целинного и пахотного участка в зависимости от экспозиции склона [Каштанов, Явтушенко, 1997]

| Элементы рельефа | Целина | | | Пашня | | |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|------------------------------|------------------------------|-------|
| | NO ₃ ⁻ | NH ₄ ⁺ | сумма | NO ₃ ⁻ | NH ₄ ⁺ | сумма |
| Водораздел | 8,4 57 | 6,4 43 | 14,8 | 25,6 91 | 2,5 9 | 28,1 |
| Склон северной экспозиции | 5,4 46 | 6,2 54 | 11,6 | 24,6 91 | 2,4 9 | 27,0 |
| Склон южной экспозиции | 2,7 19 | 11,7 81 | 14,4 | 27,5 80 | 6,9 20 | 34,4 |

Водная эрозия затрагивает процессы трансформации органического вещества черноземных почв (табл. 112). Характер включения тяжелого изотопа азота ^{15}N соответствует распределению природного органического азота почвы. Процессы эрозии в типичном черноземе (Курская обл.) не ведут к существенным изменениям процессов иммобилизации азота удобрения.

Таблица 112. Содержание азота удобрения во фракциях органического вещества чернозема типичного в зависимости от степени смытости [Руделёв, 1992]

| Почва | Азот удобрения | Гуминовые кислоты | | | | Фульвокислоты | | | | | Гу-мины | ГК: :ФК |
|-----------------------------|----------------|-------------------|-------|------|--------|---------------|------|------|------|-------|---------|---------|
| | | фракции | | | сум-ма | | | | | Сумма | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | 1a | 1 | 2 | 3 | | | |
| Чернозем типичный, несмытый | 657,0 | 25,1 | 156,2 | 28,9 | 210,2 | 42,2 | 40,5 | 16,6 | 22,7 | 122,0 | 271,0 | 1,72 |
| | 100 | 3,8 | 23,8 | 4,4 | 32,0 | 6,4 | 6,2 | 2,5 | 3,5 | 18,6 | 41,2 | |
| Чернозем типичный, смытый | 656,0 | 11,7 | 157,9 | 23,1 | 192,7 | 44,6 | 34,9 | 17,0 | 30,0 | 126,5 | 261,8 | 1,52 |
| | 100 | 1,8 | 24,1 | 3,5 | 29,4 | 6,8 | 5,3 | 2,6 | 4,6 | 19,3 | 39,3 | |

Тем не менее в среднесмытом черноземе в составе фульвокислот накапливается несколько большее количество азота удобрения с параллельным снижением его в гуминовых кислотах. Именно этим объясняется относительно большая подвижность иммобилизованного в составе гумуса азота удобрения у среднесмытого чернозема [Руделёв, 1992].

Таким образом, процесс иммобилизации у чернозема типичного разной степени смытости характеризуется преимущественным накоплением азота удобрения во фракциях гуминовых кислот (29-32%) и гуминов (40-41%) по сравнению с фракциями фульвокислот (18-19%).

Ущерб, который наносит водная эрозия, состоит не только в смыве почвы, транспорте эродированного материала с водораздельных участков к пониженным элементам рельефа, но и в значительных потерях питательных веществ почвы, в том числе азота. Потери азота связаны с существованием разных форм элемента (нитраты, нитриты, аммоний, аминокислоты), способных мигрировать с внутрипочвенным и поверхностным стоком. Кроме того, азот мигрирует с органическим веществом и в виде фиксированного аммония с твердым стоком. Со смывом почвы в Черноземной зоне теряется 7-18 кг/га азота в год [Явтушенко, Макаров, 1996]. На полях, занятых озимыми культурами, потери азота со смывом почвы сокращаются в 2-3 раза, а на полях с многолетними травами – в 10 раз.

При выращивании ячменя на северо-восточном склоне (чернозем выщелоченный, Белгородская обл.) с жидким и твердым стоком терялось примерно одинаковое количество азота (8,5-9,7 и 9,1-9,5 кг/га соответственно) [Рындыч, Явтушенко, 1987]. Наименьшее количество азота (1,0-1,5 кг/га) с жидким стоком талых вод терялось в посевах озимой пшеницы и эспарцета (табл. 113). Твердый сток под этими культурами отсутствовал полностью. На среднеэродированном типичном черноземе (Курская обл.) при смыве 4,6 т/га почвы под воздействием водной эрозии терялось 295 кг/га гумуса и 14,8 кг/га азота [Явтушенко, 1986]. На зяби мощного чернозема (Тамбовская обл.) при смыве 4 т/га почвы терялось 255 кг/га гумуса и 12,8 кг/га азота. На выщелоченном черноземе (Курская обл.) в зависимости от интен-

сивности эрозии и почвозащитной обработки терялось 57-135 кг/га гумуса и 2,8-6,8 кг/га азота [Гусаров, 1987]. Максимальные потери гумуса при почвозащитных обработках зяби составили: 168 кг/га (8 кг/га азота) при прерывистом бороздовании и 204 кг/га (10,2 кг/га азота) – при лунковании.

После двух лет последствия содержание остаточного азота удобрения (меченого ^{15}N) в среднеэродированном черноземе существенно снижается (33,7-47,3% от закрепленного) (табл. 114). Столь высокие потери иммобилизованного азота удобрения в черноземных почвах объясняется более активными процессами его трансформации.

Таблица 113. Размеры потерь азота в процессе эрозии черноземных почв

| Почва, регион | Потери азота со стоками, кг/га | | | Источник |
|--|--------------------------------|-----------|-----------|---------------------------|
| | жидким | твердым | общее | |
| Чернозем типичный, Курская обл. | 0,4-0,5 | 11,6-16,6 | 12,0-17,1 | Явтушенко, 1986 |
| Чернозем, Центрально-Черноземная зона | 0,4-3,6 | 0,5-5,5 | 0,9-9,1 | Явтушенко, Макаров, 1996 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | 1,0-9,7 | 4,3-9,8 | 5,3-19,6 | Рындыч, Явтушенко, 1987 |
| Чернозем выщелоченный, Белгородская обл. | 0,8-1,2 | 6,0-15,0 | 6,8-16,2 | Каштанов, Явтушенко, 1997 |

Таблица 114. Потери иммобилизованного азота удобрения в зависимости от степени эродированности чернозема типичного [Руделёв, 1992]

| Почва, регион | Степень эродированности | Потери, % |
|---------------------------------|-------------------------|-----------|
| Чернозем типичный, Курская обл. | Неэродированный | 33,7 |
| | Среднеэродированный | 47,3 |

Складывающиеся специфические условия склонового рельефа оказывают существенное влияние не только на поведение и трансформацию азота в почве, но и на размеры его потребления и использования возделываемыми культурами. В условиях типичного чернозема (Курская обл.) вика-овес и кукуруза на южном склоне потребляли большее количество, а зерновые – меньшее количество азота на формирование единицы продукции по сравнению с северным склоном (табл. 115).

Таблица 115. Потребление азота культурами севооборота при различной экспозиции склона [Шустрова, 2000]

| Экспозиция склона | Культуры севооборота | | | |
|-------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------|
| | вико-овес, кг/т сена | кукуруза, кг/т биомассы | озимая и яровая пшеница, кг/т | ячмень, кг/т |
| Северная | 19,7 | 4,4 | 29,1 | 33,2 |
| | 18,7 | 3,7 | 32,3 | 36,1 |
| Южная | 23,4 | 4,7 | 24,2 | 28,6 |
| | 24,0 | 5,4 | 28,6 | 33,9 |

* Числитель – контроль (без удобрений); знаменатель – навоз+минеральные удобрения.

Применение навоза и полного минерального удобрения способствовало повышению потребления азота возделываемыми культурами, кроме вико-овса и кукурузы на северном склоне [Шустрова, 2000]. В условиях выщелоченного чернозема (Белгородская обл.) на северном склоне кукуруза и озимая пшеница лучше использовали азот удобрения и азот почвы, что обеспечивало формирование более высокого урожая по сравнению с водоразделом [Явтушенко, 1991].

Ячмень потреблял меньшее количество азота при его выращивании на эродированном типичном черноземе (Курская обл.) (табл. 116), поскольку использовал меньше азота удобрения и азота почвы. С увеличением глубины внесения азотных удобрений использование азота удобрения растениями снижалось с 43,5 до 14,6% на неэродированной почве и с 21,7 до 6,9% на эродированной почве. При этом также снижалось потребление растениями и азота почвы.

Таблица 116. Влияние эрозии чернозема типичного на потребление и использование ячменем азота удобрения и азота почвы [Руделёв, 1992]

| Вариант | Общий вынос азота, кг/дел | | В т.ч. азот удобрения | | | | Азот почвы, мг/дел | |
|---|---------------------------|------|-----------------------|-----|-----------------|------|--------------------|------|
| | | | мг/дел | | % от внесенного | | | |
| | 1* | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| P ₆₀ K ₆₀ + фон | 2309 | 1574 | - | - | - | - | 2309 | 1574 |
| Фон+ ¹⁵ N ₆₀ на гл. 30 см | 3491 | 2081 | 652 | 325 | 43,5 | 21,7 | 2839 | 1756 |
| Фон+ ¹⁵ N ₆₀ на гл. 60 см | 3468 | 2038 | 495 | 163 | 33,0 | 10,9 | 2973 | 1875 |
| Фон+ ¹⁵ N ₆₀ на гл. 90 см | 2990 | 1856 | 219 | 103 | 14,6 | 6,9 | 2771 | 1753 |

* 1- чернозем неэродированный; 2- чернозем смытый.

4.3. Газообразные потери азота и эмиссия N₂O черноземными почвами

Характерной чертой современного землепользования является растущий уровень антропогенной нагрузки на агроэкосистемы, в результате чего растет содержание парниковых газов в атмосфере, которое ведет к глобальному изменению климата на планете Земля. В состав парниковых газов входит ряд азотсодержащих соединений (NO_x, N₂O, NH₃). Сложность управления эмиссией азотсодержащих соединений состоит в том, что газообразные продукты азота образуются в результате целого ряда процессов: денитрификации, нитрификации, хемоденитрификации, нитрификационной денитрификации, метанотрофной нитрификации, протекающих в почве одновременно и параллельно или в противоположном направлении [Завалин, Соколов, 2016].

В.В. Докучаев [1936] на основе обобщения работ других исследователей сделал заключение о том, что при неблагоприятных условиях гниения образуются болотный газ (метан) и свободный азот, тогда как при доступе кислорода формируются азотная и угольная кислоты, а также аммиак.

Черноземные почвы являются основным комплексом наземных экосистем и играют важную роль в биогеохимических циклах азота. Для черно-

земов характерны большие запасы углерода и азота и активное развитие почвенно-биотического комплекса.

Газообразные потери азота из черноземных и дерново-подзолистых почв происходят в основном в форме закиси и молекулярного азота [Макаров, 1978; Смирнов, 1977; Борисова и др., 1978; Варюшкина, 1979]. В первые две недели после внесения азотного удобрения за 1 сутки из чернозема терялось 7,6 г/га окислов азота, из дерново-подзолистой – 2,9 г/га (табл. 117).

Таблица 117. Потери азота из различных почв [Борисова и др., 1978]

| Почва, регион | Потери азота, г/га | | |
|--------------------------------------|--------------------|------------------|-------|
| | NO | N ₂ O | всего |
| Чернозем типичный, Курская обл. | 0,43 | 7,2 | 7,63 |
| Дерново-подзолистая, Московская обл. | 0,20 | 2,7 | 2,90 |

За период наиболее интенсивного выделения газообразных продуктов потери азота в виде окислов составили: из чернозема – 200 г/га, из подзолистой почвы – 90 г/га [Борисова и др., 1978]. Газообразные потери из различных почв представлены в основном закисью азота (более 90% от общих потерь).

Потери азота удобрения на черноземных почвах России колеблются в широких пределах: от 7 до 64% от применяемой дозы (табл. 118, 119). По обобщенным данным в зависимости от вида выращиваемой культуры – от 10 до 58%, в среднем – 27%, средняя величина потерь азота удобрения по всем типам почв составляет 24% [Кореньков, 1999]. Минимальное количество азота (7-8%) терялось при выращивании капусты и сахарной свеклы, максимальное (53-64%) – при выращивании риса.

Таблица 118. Потери азота минеральных удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур на черноземных почвах, % от применяемой дозы

| Почва, регион | Сельскохозяйственная культура | Форма и доза азотного удобрения | Потери азота удобрения | Автор, год |
|--|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------|
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | Капуста | N _{aa} , 100-200 | 8-17 | Назарюк, 1983 |
| Чернозем оподзоленный, Новосибирская обл. | | N _{aa} , 1,8 г/дел | 35-40 | Назарюк, 2002 |
| Чернозем типичный, Ростовская обл. | Озимая пшеница (без орошения) | N _a , 60-120 | 30-41 | Смирнов, 1977 |
| Чернозем предкавказский, Ставропольский край | | N _{aa} , 60 | 27-31 | Смирнов, 1977 |
| Чернозем предкавказский, Ставропольский край | Озимая пшеница (орошение) | N _{aa} , 60,120 | 20-34 | Смирнов, 1977 |
| Лугово-черноземовидная, Краснодарский край | Рис | N _a , N _m , 120 | 40-53 | Смирнова и др., 1976 |
| Лугово-черноземовидная, Краснодарский край | | N _a , N _m , 120 | 18-64 | Бочкарев, 1984 |

Окончание табл. 118

| Почва, регион | Сельскохозяйственная культура | Форма и доза азотного удобрения | Потери азота удобрения | Автор, год |
|---|-------------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------|
| Чернозем выщелоченный, Киевская обл. | Сахарная свекла | N_{aa} , 50-200 | 4-21 | Бондаренко, 1989 |
| Чернозем типичный, Белгородская обл. | | N_c , 120 | 14-21 | Лукин, 1992, 1999 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Яровая пшеница | N_{aa} , N_a , 90 | 17-28 | Гамзиков, 2013 |
| Лугово-черноземная, Бурятия | | N_m , 80 | 31-32 | Будажаров, 2009 |
| Чернозем предкавказский, ставропольский | Ячмень | N_{aa} , 40-120 | 11-16 | Смирнов, 1977 |
| Чернозем южный, Бурятия | | N_a , 60 | 48 | Будажаров, 2009 |
| Лугово-черноземная мерзлотная, Бурятия | | N_a , 60 | 27 | Будажаров, 2009 |

Таблица 119. Потери азота удобрений при возделывании различных культур на черноземных почвах, % от применяемой дозы

| Культура | Потери азота |
|------------------------------|--------------------------------|
| Капуста | 22-28 |
| Озимая пшеница, без орошения | 28-36 |
| Озимая пшеница, при орошении | 20-34 |
| Рис | 29-58 |
| Сахарная свекла | 10-21 |
| Яровая пшеница | 24-34 |
| Ячмень | 11-30 |
| | Среднее от меньшего к большему |
| | Общее среднее |
| | 27 |

Потери азота при выращивании озимой пшеницы на черноземе типичном (Белгородская обл.) при внесении мочевины достигают 23% от применяемой дозы (табл. 120).

Таблица 120. Газообразные потери азота мочевины и азота биомассы горчицы белой при выращивании озимой пшеницы

| Вариант | Потери азота | |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|
| | г/м ² | % от внесенного |
| $P_{60}K_{60}$ – фон | - | - |
| Фон + ¹⁵ Nм | 1,38 | 23 |
| Фон + ¹⁵ Горчица | 0,66 | 10 |
| Фон + ¹⁵ Горчица + 1/3 Nм | 0,90 | 15 |

При внесении биомассы горчицы белой (меченой ¹⁵N) потери азота снижались до 10%, т.е. более чем в 2 раза. При совместном применении биомассы горчицы и мочевины потери азота горчицы увеличивались в 1,5 раза, что связано с усилением процессов минерализации органического вещества горчицы.

Закись азота. В силу специфических свойств и воздействия на озоновый слой стратосферы закись азота представляет экологическую угрозу. Почвы играют ведущую роль в образовании N_2O , на их долю приходится 35% глобальных выбросов газа. Суммарная почвенная эмиссия N_2O составляет 4,7-6,3 Гт азота в год, т.е. примерно 25-40% (320 млрд. т) от общего поступления в атмосферу [Бучкина и др., 2008; Тембо и др., 2014; Саржанов, 2016].

Закись азота поступает в атмосферу в результате микробиологических процессов, протекающих в почве. Эмиссия N_2O почвой зависит от многих факторов, основными из которых являются: тип и подтип почвы, вид ценоза, тип и длительность сельскохозяйственного использования, климат, микробиологические, агрофизические и агрохимические свойства почвы [Девятова, 2010].

Для почв целинной степи (чернозем типичный и выщелоченный, «Стрелецкая степь», Курская обл.) характерна сезонная динамика потоков N_2O в интервале от минуса 0,05 (третья декада июня) до 0,24 мг N_2O/m^2 день (вторая декада сентября [Тембо и др., 2014]. Максимальный пик эмиссии N_2O приходится на вторую декаду октября (0,69 мг N_2O/m^2 день).

Сезонная динамика потоков N_2O черноземов косимой степи изменяется от минуса 0,5 мг N_2O/m^2 день (третья декада июня) до 0,37 мг N_2O/m^2 день (первая декада сентября). В отличие от лугово-степных экосистем динамика почвенных потоков N_2O в агроecosистемах пастбища и черного пара характеризуется четко выраженной эмиссией, максимальное значение которой составляет 0,85-0,74 мг N_2O/m^2 день соответственно. Максимальное количество N_2O из почв пастбища выделяется в первой половине сезона (май-июль). На почвах черного пара проявляется сезонная динамика потоков N_2O от минуса 0,01 мг N_2O/m^2 день в первой декаде мая до 0,74 мг N_2O/m^2 день во второй декаде октября.

Для типичного чернозема пастбища характерна максимальная эмиссия 0,21 мг N_2O/m^2 день с суммарным значением эмиссии за сезон 33,6 мг N_2O/m^2 (336 г $N_2O/га$). Суммарный сток за сезон почв косимой степи составил минус 4,8 мг N_2O/m^2 (48 $N_2O/га$). Почвы черного пара продуцировали на 38% меньше N_2O , чем почвы пастбища и на 15,4% больше, чем почвы некосимой степи.

Минимальное количество N_2O продуцировал чернозем обыкновенный (Каменная Степь, Воронежская обл.) при длительном использовании пашни, что связано с малым количеством нитратов и низким запасом микробной биомассы (табл. 121).

Таблица 121. Эмиссия N_2O в зависимости от запаса микробной биомассы и содержания нитратов [Девятова, 2010]

| Агроценоз | Эмиссия N_2O мг N- $N_2O/г.ч.$ | Микробная биомасса, мкг/г почвы | Содержание нитратов, мг N- $NO_3/кг$ почвы |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|
| Пашня более 80 лет | 0,00015 | 321,89 | 9,96 |
| Пашня более 15 лет | 0,00146 | 425,85 | 22,65 |
| Залежь некосимая | 0,00104 | 494,87 | 26,65 |
| Залежь косимая | 0,00104 | 407,66 | 18,71 |

Почва естественных ценозов характеризуется постепенным увеличением накопления закиси азота. Почва сельскохозяйственных угодий характеризуется минимальным выделением N_2O [Девятова, 2010]. Авторы делают вывод о том, что «перевод пахотных почв в залежи, имеющий место во многих регионах в последние десятилетия, может сопровождаться увеличением эмиссии N_2O в атмосферу».

Максимальное увеличение потока N_2O происходит в процессе оттаивания почвы зимой и увлажнения летом. Резкое увеличение эмиссии N_2O происходит после выпадения дождя во время летней засухи. Оно обусловлено неполной денитрификацией и может продолжаться от нескольких часов до нескольких суток [Благодатская и др., 2001].

4.4. Экологические последствия подкисления черноземных почв

По данным многочисленных наблюдений повсеместно происходит подкисление почвенного раствора не только выщелоченных, но и типичных и даже обыкновенных черноземов [Шильников, 1977; Акулов, 1992; Богомазов, 1994; Лазарев, 2001; Надежкина, Лебедева, 2003; Чекмарев и др., 2010; Чекмарев, Лукин, 2014]. Так, только в ЦЧР России 49% площади пашни имеют повышенную кислотность и нуждаются в химической мелиорации. Ежегодное уменьшение величины рН составляет 0,03.

Процессу подкисления черноземов способствуют кислотные дожди, вымывание кальция и магния, нерациональное применение минеральных удобрений, повышенная доля пропашных культур в севообороте [Акулов, 1992; Богомазов, 1994]. Изменение реакции среды влияет на направленность и интенсивность трансформации азота в почве и его доступность растениям.

Для черноземных почв характерны большие запасы углерода и азота, а также активное развитие почвенно-биотического комплекса. Реакция среды играет регулируемую роль в образовании и эмиссии парниковых газов (N_2O , NO). Высокий уровень содержания NO_3^- в почве и снижение рН с 7 до 5 увеличивают долю N_2O в составе газообразных продуктов. Экологическое значение гетеротрофной нитрификации состоит в том, что, в отличие от автотрофной нитрификации, она активно протекает в кислых условиях среды.

Декальцинирование почв ЦЧР является «пусковым механизмом» деградации черноземов, вследствие чего происходит ряд негативных процессов: подкисление почвенного раствора, потери органического вещества, ухудшение агрофизических свойств и микробиологической активности, ухудшение качества продукции растениеводства, снижение эффективности применения удобрений [Юмашев, Логошина, 2005; Чекмарев и др., 2010].

Потери кальция происходят в процессе внутрпочвенной миграции, в результате может теряться до 300 кг/га элемента. Кроме того, выращиваемые сельскохозяйственные культуры потребляют 25-40 кг/га кальция. Подкисление черноземов происходит в результате выпадения кислотных осадков (рН 3-4) вокруг промышленных центров. Ежегодные потери урожая зерновых

культур за счет кислотности составляют 10-12 млн. т зерна в год [Чекмарев, Лукин, 2014].

При выращивании яровой пшеницы на черноземе выщелоченном (Пензенская обл.) снижение величины рН ниже исходного вызывало повышение содержания аммонийного азота в 1,8 раза. С увеличением рН с 5,0 до 6,0 его количество снизилось с 7,4 до 4,1 мг/кг почвы, а в интервале с 6,0 до 7,5 с 4,1 до 3,8 мг/кг, т.е. содержание NH_4^+ стабилизируется (рис. 7).

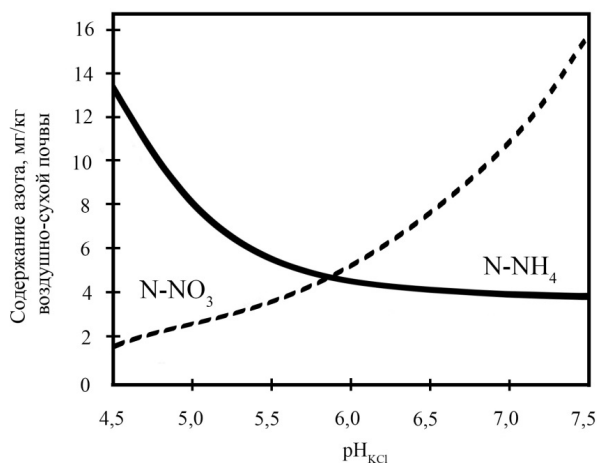


Рисунок 7. Содержание нитратного и аммонийного азота в зависимости от реакции почвы (в среднем за 3 года) [Лазарев, 2001]

Несколько иначе изменялось содержание нитратов. С повышением рН с 4,5 до 6,0 количество NO_3^- повышалось медленно с 1,9 до 3,0 мг/кг почвы, а при изменении рН с 6,0 до 7,5 содержание нитрата возросло в 2,4-5,5 раза по сравнению с исходным уровнем (рН 5,13) [Лазарев, 2001]. В выщелоченном черноземе (Белгородская обл.) с увеличением кислотности от рН 6,5 до 3,5 содержание NO_3^- снижалось в 5,5 раза, а N-NH_4^+ повышалось в 3,5 раза, хотя общее количество минерального азота снижалось в 1,4 раза [Акулов, 1992].

Содержание щелогидролизуемого азота в пахотном слое выщелоченного чернозема (Белгородская обл.) составило 146-147 мг/кг, в подпахотном 131-132 мг/кг [Богомазов, 1994]. В кислом интервале рН интенсивнее протекают процессы аммонификации, в нейтральной – нитрификации (табл. 122). При подкислении среды содержание минерального азота в пахотном слое снижалось в 1,4-1,5 раза.

Таблица 122. Влияние уровней реакции среды выщелоченного чернозема на содержание минерального азота в почве, мг/кг [Богомазов, 1994]

| Форма азота | Значение рН | | | | | | |
|--------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 |
| N по Корнфилду | 170,5 | 164,8 | 159,6 | 155,3 | 152,2 | 150,5 | 150,5 |
| N- NO_3^- | 11,0 | 19,3 | 27,4 | 35,6 | 43,8 | 50,2 | 60,2 |
| N- NH_4^+ | 34,9 | 30,8 | 26,6 | 22,4 | 18,2 | 14,0 | 9,9 |

Изменение величины рН влечет за собой смену активности ферментов, участвующих в азотном обмене. Так, наибольшей активностью протеаза обладает при рН 6,5, уреазы – при рН 7,0. При изменении рН в сторону кислотности или щелочности активность протеазы снижается в 1,2-2,5 раза, уреазы – в 1,1-2,2 раза. При известковании почвы активность протеазы возрастает на 34-51%, уреазы – на 59-63% [Лазарев, 2001].

Минимальное количество N- NO₃⁻ в почве под яровой пшеницей находилось перед посевом и в период полной зрелости зерна (рис.8). Содержание N- NH₄⁺ существенно снижалось во второй половине вегетации растений. Максимальное количество нитратов в почве содержалось в середине лета (трубкование-колошение пшеницы), аммонийного азота – в начале вегетации растений.

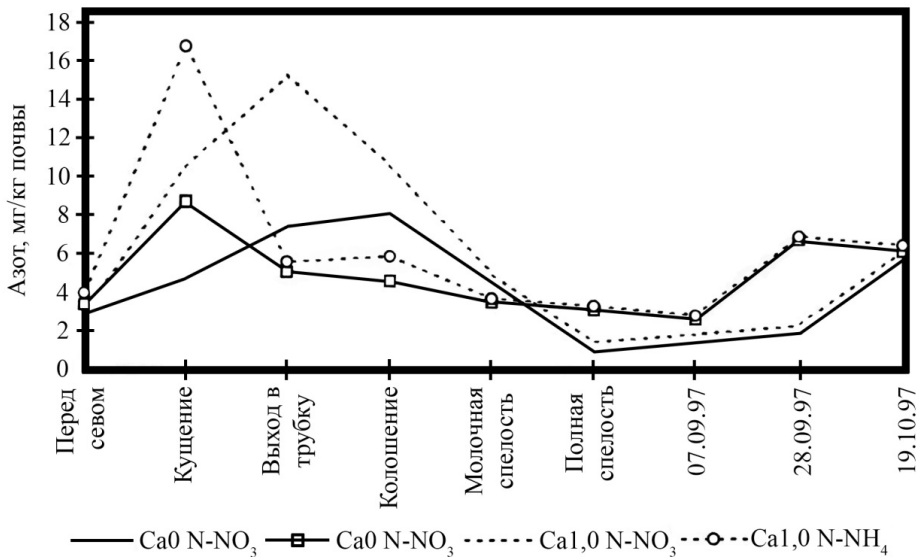


Рисунок 8. Динамика минеральных форм азота в пахотном слое чернозема под яровой пшеницей в 1997 г. [Лазарев, 2001].

При известковании количество минерального азота в почве повышалось: нитратов – на 30%, аммонийного азота – на 23% [Лазарев, 2001]. Наибольшее количество минерального азота в почве содержалось при совместном применении навоза, минеральных удобрений и сидерата (редька масличная).

Ход минерализационных процессов определяется рН почвенного раствора. При повышении гидролитической кислотности на 1 мг-экв./100 г, содержание N- NO₃⁻ снижалось на 0,22 мг/кг, а при увеличении рН на 0,1 ед. – возрастало на 0,057 мг/кг почвы.

Изменение кислотных свойств чернозема выщелоченного происходит вследствие накопления аммонийного или нитратного азота. В период от посева до кушения яровой пшеницы, когда происходит дезаминирование и аммонификация аминокислот и более интенсивно продуцируется

N- NH_4^+ , происходит подщелачивание почвы, снижается гидролитическая кислотность и повышается pH. В дальнейшем при окислении аммония (преобладают процессы нитрификации) кислотность почвы возрастает.

Между кислотными свойствами выщелоченного чернозема и содержанием минеральных форм азота существует зависимость, которая выражается рядом уравнений регрессии [Лазарев, 2001]:

$$\text{pH} = 4,81 - 0,023 \text{ N-NO}_3^-; \quad r = -0,64$$

$$\text{Nr} = 7,72 + 0,041 \text{ N-NO}_3^-; \quad r = 0,83$$

$$\text{pH} = 4,71 - 0,033 \text{ N-NO}_3^- + 0,032 \text{ N-NH}_4^+; \quad r = 0,60$$

$$\text{Nr} = 7,79 + 0,049 \text{ N-NO}_3^- - 0,025 \text{ N-NH}_4^+; \quad r = 0,73$$

Независимо от pH почвенного раствора при выращивании озимой пшеницы на типичном черноземе (Белгородская обл.) при внесении стоков свиноводческого комплекса (ССК (N_{60}), pH 7,8, $\text{N}_{\text{общ.}}$ 0,21%) растения меньше потребляли и использовали азот удобрения (табл. 123). При этом возрастало потребление азота почвы, в том числе экстра-азота. Растения использовали азот ССК равноценно азоту удобрения.

При снижении pH до 5,0 уменьшалось потребление азота удобрения в 1,1-1,2 раза, азота почвы – в 1,4-1,6 раз, азота стоков – в 1,1-1,2 раза. При этом существенно (в 1,6-2,7 раза) снижалась мобилизация почвенного азота (потребление экстра-азота).

Таблица 123. Потребление и использование азота удобрения, азота почвы и азота стоков озимой пшеницей в зависимости от pH чернозема типичного

| Вариант | Общий вынос N, г/м ² | N удобрения | | N почвы | | N стоков | |
|--|---------------------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|
| | | г/м ² | % от внесенного | г/м ² | Экстра- N, г/м ² | г/м ² | % от внесенного |
| pH 6,5 | | | | | | | |
| $\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ – фон | 4,37 | - | - | 4,37 | - | - | - |
| Фон + $^{15}\text{N}_{60}$ | 10,58 | 2,18 | 36,4 | 8,40 | 4,03 | - | - |
| Фон + $^{15}\text{N}_{60}$ + ССК (N_{60}) | 16,25 | 1,84 | 30,7 | 12,53 | 8,16 | 1,88 | 31,3 |
| pH 5,0 | | | | | | | |
| $\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ – фон | 3,63 | - | - | 3,63 | - | - | - |
| Фон + $^{15}\text{N}_{60}$ | 7,05 | 1,94 | 32,3 | 5,11 | 1,48 | - | - |
| Фон + $^{15}\text{N}_{60}$ + ССК (N_{60}) | 11,92 | 1,62 | 27,0 | 8,62 | 4,99 | 1,68 | 28,0 |

Внесение ССК повышало иммобилизацию азота мочевины в 2 раза при pH 6,5 и в 1,9 раза при pH 5,0 (табл. 124). При этом ССК снижали газообразные потери азота мочевины в 1,6-2,5 раза. При снижении pH до 5,0 уменьшалась иммобилизация азота удобрения и повышались газообразные потери его в 1,2-1,8 раза.

Таблица 124. Потоки азота удобрения при выращивании озимой пшеницы в зависимости от pH чернозема типичного

| Вариант | Использовано растением | | Иммобилизация в слое почвы 0-30 см | | Потери | |
|--|------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | г/м ² | % от внесенного | г/м ² | % от внесенного | г/м ² | % от внесенного |
| pH 6,5 | | | | | | |
| P ₆₀ K ₆₀ – фон | | | | | | |
| Фон + ¹⁵ N ₆₀ | 2,16 | 36 | 1,66 | 28 | 2,16 | 36 |
| Фон + ¹⁵ N ₆₀ + ССК (N ₆₀) | 1,84 | 31 | 3,30 | 55 | 0,86 | 14 |
| pH 5,0 | | | | | | |
| P ₆₀ K ₆₀ – фон | | | | | | |
| Фон + ¹⁵ N ₆₀ | 1,94 | 32 | 1,50 | 25 | 2,56 | 43 |
| Фон + ¹⁵ N ₆₀ + ССК (N ₆₀) | 1,62 | 27 | 2,82 | 47 | 1,56 | 26 |

Основные потери азота удобрения черноземных почв лесостепи Поволжья происходят в газообразной форме, за счет вымывания теряется незначительное их количество (0,5-2,3% от внесенной дозы) [Надежкина, Лебедева, 2003]. Снижению потерь азота удобрения (на 26-39%) способствовало известкование выщелоченного чернозема (Пензенская обл.) по полной гидролитической кислотности (табл. 125). Потери азота обусловлены образованием нитратов. При кислой реакции среды (pH<5,5), образующиеся NO₂⁻, разлагаются с образованием газообразных соединений (NO и N₂O). Известкование снижает образование закиси азота, что уменьшает опасность разрушения озонового экрана и играет особую природоохранную роль.

Таблица 125. Потери азота удобрения в зависимости от известкования и предварительной удобренности почвы, % от применяемой дозы [Надежкина, Лебедева, 2003]

| Предварительная удобренность почвы | Фон | |
|------------------------------------|--------------|---------|
| | Без известки | Известь |
| Без удобрения | 32,8 | 21,5 |
| Навоз | 24,8 | 14,0 |
| NPK | 28,8 | 24,5 |
| Навоз+ NPK | 19,5 | 13,5 |

Использование в исследованиях стабильного изотопа азота ¹⁵N позволило определить интенсивность процессов внутрипочвенного цикла азота (минерализация D иммобилизация/реиммобилизация) в зависимости от pH почвенного раствора (табл. 126). Применение ССК повышало мобилизацию почвенного азота и увеличивало количество нетто-минерализованного азота при pH 5,0. Внесение ССК усиливает процессы иммобилизации азота почвы в 3-4 раза. Складывающиеся условия минерализации почвенного азота влияли на образование газообразных азотных соединений (денитрификация D нитрификация). При pH 6,5 внесение ССК сопровождалось снижением в 1,8 раза газообразных потерь азота почвы. Однако при pH 5,0, наоборот, с внесением ССК существенно (1,2 раза) усиливается образование газообразных продуктов по сравнению с применением одной мочевины.

Таблица 126. Поток азота почвы и азота удобрения при выращивании озимой пшеницы в зависимости от рН чернозема типичного, г/м²

| Показатели | рН 6,5 | | рН 5,0 | |
|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| | Фон + ¹⁵ N ₆₀ | Фон + ¹⁵ N ₆₀ + ССК (N ₆₀) | Фон + ¹⁵ N ₆₀ | Фон + ¹⁵ N ₆₀ + ССК (N ₆₀) |
| Вынос азота почвы растениями | 9,40 | 11,28 | 5,11 | 8,62 |
| Остаточный минеральный азот | 1,12 | 1,02 | 0,94 | 0,90 |
| Иммобилизованный/реимобилизованный азот | 7,32 | 20,23 | 3,95 | 15,00 |
| Газообразные потери азота | 9,40 | 5,27 | 6,74 | 8,30 |
| Минерализованный азот, М | 27,24 | 37,60 | 16,74 | 32,82 |
| Нетто-минерализованный азот, Н•М | 20,02 | 17,57 | 12,79 | 17,82 |
| Реимобилизованный азот, РИ | 6,20 | 19,21 | 3,01 | 14,10 |
| Использованный азот удобрения растениями | 2,16 | 1,84 | 1,94 | 1,62 |
| Иммобилизованный азот удобрения | 1,68 | 3,30 | 1,50 | 2,00 |
| Газообразные потери азота удобрения | 2,16 | 0,86 | 2,56 | 1,56 |

Минерализованный за период вегетации озимой пшеницы азот почвы (М) рассматривается как «вход» вещества в систему. Нетто-минерализованный азот (Н•М) является «выходом», а «возвратом на выходе» служит реимобилизованный азот, идущий на поддержание системы в устойчивом состоянии. Устойчивость системы обеспечивается возвратом 50% вещества, при котором система приближается к состоянию экологического равновесия (гомеостазу) [Одум, 1986; Помазкина и др., 1999]. Интегральным показателем функционирования агроэкоecosистемы является отношение Н•М:РИ, характеризующее соотношение между потоками азота, направленными в гетеро- и автотрофный циклы. Показатель Н•М:РИ, близкий или равный единице, возможен при рециркуляции, близкой 50%. Чем выше значение соотношения Н•М:РИ, тем менее устойчива система. В то же время чем ниже значение отношения РИ:М (циркуляция азота), тем менее устойчива система. Самоорганизованная смена режимов функционирования агроэкоecosистемы происходит в зависимости от величины антропогенной нагрузки.

Показатели интенсивности круговорота азота отражают степень устойчивого функционирования агроэкоecosистемы при применении органических и минеральных удобрений (табл. 127). При внесении мочевины (60кг/га) агрофитоценоз озимой пшеницы при рН 6,5 находится в состоянии резистентности, а при рН 5,0 – состоянии адаптационного истощения. Внесение ССК повышает устойчивость агрофитоценоза при рН 6,5 до состояния экологического равновесия (гомеостазу), тогда как при рН 5,0 до состояния близкого к стрессу.

Таблица 127. Показатели устойчивого функционирования агрофитоценоза озимой пшеницы

| Критерии | рН 6,5 | | рН 5,0 | |
|-----------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| | Фон+ ¹⁵ N _м | Фон+ ¹⁵ N _м + ССК(N ₁₀₀) | Фон+ ¹⁵ N _м | Фон+ ¹⁵ N _м + ССК(N ₁₀₀) |
| РИ : М, % | 23 | 52 | 18 | 43 |
| Н•М : РИ | 3,2 | 0,9 | 4,2 | 1,3 |

Изменение режима азотного питания растений и устойчивости агрофитоценоза оказывало влияние на продуктивность и качество зерна озимой пшеницы (табл. 128). Подкисление чернозема типичного (Белгородская обл.) до pH 5,0 снижало урожайность зерна озимой пшеницы при внесении минеральных и органических удобрений на 24-31%, при этом содержание сырого белка в зерне снижалось на 0,9-1,0%. Ранее было установлено, что выращивание озимой пшеницы на кислой почве сопровождалось снижением содержания белка и увеличением количества небелкового азота в зерне [Коданев, 1976]. Внесение мочевины повышало содержание сырого белка в зерне на 20% при pH 6,5 и на 1,4% при pH 5,0, при внесении мочевины и ССК – на 2,7% и на 2,2% соответственно.

Таблица 128. Урожайность и содержание сырого белка в зерне озимой пшеницы при различном значении pH чернозема типичного

| Вариант | Зерно, г/м ² | | Сырой белок, % | |
|--|-------------------------|--------|----------------|--------|
| | pH 6,5 | pH 5,0 | pH 6,5 | pH 5,0 |
| P ₆₀ K ₆₀ – фон | 18,1 | 15,6 | 10,4 | 10,0 |
| Фон + ¹⁵ N ₆₀ | 38,5 | 26,7 | 12,4 | 11,4 |
| Фон + ¹⁵ N ₆₀ + ССК (N ₆₀) | 54,2 | 41,4 | 13,1 | 12,2 |

Таким образом, подкисление черноземов влечет за собой существенные изменения в биологической активности и азотного режима почв (минерализация, иммобилизация), в использовании азота растениями, в образовании и эмиссии газообразных азотсодержащих соединений и в целом в устойчивости агроэкосистем, в формировании урожая и его качества возделываемых культур.

4.5. Потоки азота в природных водах в зоне черноземов

Широкое вовлечение земель и воды в сельскохозяйственное и промышленное производство, использование агрохимикатов, концентрация животноводства, образование и накопление больших количеств промышленных и животноводческих отходов в сильной мере отражаются на химическом составе воды и ее качестве. Наиболее подвержены загрязнению внутренние воды, которые, наряду с интенсивным использованием, обладают низким эффектом разбавления и ограниченным потенциалом самоочищения.

Поступление азота с атмосферными осадками является одним из источников поддержания нитратного бюджета наземных экосистем. Концентрация азотистых соединений отражает уровень их содержания в атмосфере, поэтому увеличение размеров поступления NO₃⁻ и NH₄⁺ с осадками свидетельствует о загрязнении атмосферного воздуха аммиаком и NO_x. Атмосферный фонд азота пополняется газообразными соединениями азота, образующимися в ходе природных процессов трансформации органического вещества почвы и азота удобрений, вулканических извержений, грозовых разрядов, а также в результате хозяйственной деятельности человека.

Среднее время пребывания в атмосфере NO_x не превышает одних суток, мелкодисперсных нитратсодержащих аэрозолей – 5 суток, поэтому мигра-

ция этих соединений с воздушным потоком от источника выбросов достигает сотен и тысяч километров [Василенко и др., 1985].

Влияние точечных источников загрязнения атмосферы аммиаком и окислами азота на содержание минеральных форм азота в осадках проявляется и в локальном масштабе. Содержание N- NH₄⁺ в осадках под влиянием расположенного вблизи навозохранилища превышало в 3-4 раза его количество в других точках наблюдения (табл. 129).

Таблица 129. Поступление азота аммония и нитратов с атмосферными осадками в сельской и городской местности, кг/га год [Hoeft et al., 1972]

| Форма азота | Сельскохозяйственный район (вблизи навозохранилища) | Сельский район (контрольный участок) | Городской район |
|--------------------|---|--------------------------------------|-----------------|
| N- NO ₃ | 3,5 | 2,7 | 3,6 |
| N- NH ₄ | 12,2 | 2,9 | 3,6 |
| N органический | 14,4 | 7,5 | 6,2 |

Обращает на себя внимание высокий уровень содержания неидентифицированных азотсодержащих органических соединений, их содержание превышает в 2 раза количество в осадках других точек наблюдения. Источник поступления N- NO₃ по своей природе относится к смешанному, а по количеству нитратов – к неконцентрированному. Поступающего с осадками азота недостаточно для повышения уровня нитратов в почве, однако этот источник важен для поддержания азотного баланса в водоемах.

В атмосферных осадках содержится больше аммонийного азота, чем нитратного. Зимние осадки содержат больше примесей. За счет атмосферных осадков в почву поступает: в ЦЧР – 5-6, Заволжье – 4-5, Предуралья, Зауралья – 3-4, Западной Сибири – 4-5, Средней Сибири – 2-3 кг N/га [Щербаков, Рудай, 1983; Назарюк, 2004].

При выпадении осадков и орошении возделываемых культур происходит инфильтрация N- NO₃ в более глубокие слои почвы вплоть до уровня грунтовых вод. Размеры нисходящего потока нитратов с инфильтрационными водами зависят от ее типа и механического состава, доз применяемых удобрений (таб. 130). Наибольшее количество N- NO₃ вымывается на дерново-подзолистых почвах легкого механического состава.

Таблица 130. Вымывание азота из различных типов почв в лизиметрических исследованиях, кг/га

| Почва | Количество вымываемого азота | Источник |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Дерново-подзолистая супесчаная | 38,0-90,4 | Варюшкина, 1979 |
| Дерново-подзолистая суглинистая | 5,0-25,0 | Юшкевич, 1972 |
| Чернозем обыкновенный | 24,0-29,0 | Экологические последствия..., 1982 |

При применении минеральных удобрений количество вымываемых нитратов в дерново-подзолистой почве возрастает в 4 раза [Юшкевич 1972; Варюшкина, 1979]. Между дозой внесенного удобрения и количеством вымываемого азота существует квадратичная регрессионная зависимость.

Органический азот, содержащийся в навозе, в результате ряда процессов превращается в нитраты, что приводит к локальному ухудшению качества подземных вод в местах расположения навозохранилищ, отстойников навозной жижи, силосоохранилищ, откормочных площадок и других объектов интенсивного животноводства. Однако, как правило, они не представляют большой опасности для подземных вод, если только водоносные горизонты не находятся непосредственно под этими объектами.

Миграция нитратов по поверхности почвы происходит в результате поверхностного стока талых и ливневых вод, водной или ветровой эрозии. Основными факторами, определяющими поступление нитратов в водоемы с поверхностным стоком, являются интенсивность атмосферных осадков и их сезонное распределение, особенности рельефа местности, характер землепользования. Концентрация нитратов в поверхностном стоке с пашни выше, чем с залуженной поверхности почвы. В отдельные годы на удобренных участках выщелоченного чернозема (Курская обл.) концентрация минерального азота в стекаемых водах достигала 25-61 мг/л, и две третьих его представлена нитратной формой. Со стоком и смывом теряется от 1,0 до 9,7 кг/га аммонийного и нитратного азота [Явтушенко, 1986].

Содержание аммонийного азота возрастает в воде поверхностного стока с пашни при орошении типичного чернозема (Белгородская обл.) 2800 м³/га осветленными стоками свиноводческого комплекса (табл. 131). При орошении стоками люцерны содержание азота в воде снижалось в 2 раза [Левенец и др., 1983].

Таблица 131. Содержание питательных веществ (мг/л) в воде поверхностного стока на черноземе типичном, орошаемом осветленными стоками со свиноводческих ферм [Левенец и др., 1983]

| Питательное вещество | Пашня | | Многолетние травы, орошаемые стоками |
|----------------------|--------------|------------------|--------------------------------------|
| | без орошения | орошение стоками | |
| Азот аммиачный | 0 | 8,9 | 1,2 |
| Азот нитратный | 2,5 | 1,9 | 0 |
| Азот общий | 9,3 | 22,0 | 13,5 |
| Фосфор подвижный | 0 | 4,1 | 1,3 |
| Фосфор общий | 0,4 | 7,9 | 2,0 |
| Калий общий | 5,0 | 11,7 | 5,9 |

Зона черноземов отличается тем, что здесь не выращивают в промышленных масштабах лен, но возделывают преимущественно весь рис России (180 тыс. га, лугово-черноземная почва Краснодарский край), выращивание которого связано с использованием огромного количества воды (21-23 тыс. м³/га) и удобрений (180-200 кг N/га). В районах интенсивного рисоводства при использовании больших количеств воды создается опасность поступления значительного количества азота удобрения (до 30% от применяемой дозы) в лиманы. С водой Джерелиевского главного коллектора в Кирпильский лиман поступало от 306 до 654 кг нитратного азота в

год [Бочкарев, 1984]. С водой Южного магистрального сброса в Курганский лиман поступало от 45 до 198 т азота нитратов, что соизмеримо с потерями азота в аммонийной и органической форме. Таким образом, с 1 га Джерелиевской оросительной системы со сбросными водами теряется от 8 до 18 кг нитратного азота ежегодно. При локальном внесении (вместе с семенами) мочевины в 1,3-1,5 раза замедляется процесс нитрификации, а потери азота при этом снижаются в 2,5 раза по сравнению с традиционным способом применения удобрений.

Значительная часть NO_3^- весной накапливается в грунтовых водах верхних горизонтов (колодцы), а затем в воде более глубоких слоев (артезианские скважины) (табл. 132).

Увеличение количества нитратов в воде рек Краснодарского края происходит в весенние месяцы за счет как поверхностного, так и грунтового стока. Весной в воде одного из притоков реки Кубань (р. Кочеты) содержалось до 16 мг/л азота нитратов, а в грунтовой воде – свыше 60 мг/л.

Таблица 132. Динамика содержания нитратов в грунтовых водах и в воде р. Кубань, мг/л [Симакин, 1969]

| Источники воды и глубина ее залегания | Даты | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 28,02 | 28,03 | 28,04 | 28,05 |
| Колодезная вода (6 м) | 19,8 | 42,4 | 35,5 | 61,6 |
| Вода артезианских (50 м) | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,4 |
| Вода р. Кубань | 0,2 | 0,2 | 3,1 | 2,9 |

Наибольшее увеличение содержания NO_3^- в воде рек Татарстана происходило в период интенсивного стока талых вод и массового половодья, что связано с усилением эрозионных процессов и выносом азота с сельскохозяйственных угодий, потери которого составляли 4,3-7,8 кг N/га [Морозов, 1984].

Содержание азота в воде колодца с. Терновка (расположенного выше орошаемых полей) достигало 150 мг/л, что свидетельствует о другом источнике загрязнения грунтовых вод (табл. 133). Содержание азота в воде рек выше полей орошения стоками также оказалось выше нормы.

Однако содержание азота в воде рек, расположенных на 0,5-1 км ниже хранилища жидкого навоза существенно (в 1,4 раза) повышалось (табл. 134).

Таблица 133. Содержание питательных веществ в пробах воды, мг/л [Левенец и др., 1983]

| Место отбора образца воды | Азот | | Фосфор | | Калий | |
|---------------------------|--------|----------|---------|-------|------------|----------|
| | А | Б | А | Б | А | Б |
| Р. Липовый Донец | 0-12,9 | 0-9,2 | 0-1,8 | 0-0,5 | 1,6-8,7 | 2,1-8,1 |
| Р. Ерик | 0-4,7 | 0-4,3 | 0-1,4 | 0-1,0 | 1,9-8,0 | 3,5-8,9 |
| Колодцы в с. Терновка | 16,4 | 5,6-39,3 | 0,2-0,6 | 0-0,2 | 26,0-122,0 | 5,9-23,0 |

А – пробы воды взяты выше расположения орошаемых полей; Б – ниже.

Таблица 134. Содержание питательных веществ в пробах воды р. Липовый Донец в зависимости от расположения животноводческих ферм, мг/л [Левенец и др., 1983]

| Место отбора образца воды по отношению к хранилищу жидкого навоза | P ₂ O ₅ | | Азот общий | K ₂ O общий |
|---|-------------------------------|-----------|------------|------------------------|
| | общий | подвижный | | |
| Выше на 3 км | 3,8 | 2,7 | 25,9 | 7,0 |
| Ниже на 0,5-1 км | 5,8 | 4,8 | 35,7 | 14,0 |
| Ниже на 20 км | 5,5 | 4,2 | 25,9 | 7,0 |

Благодаря самоочищению (через 20 км) содержание азота в воде реки приближалось к исходному. Отсюда следует вывод, что в загрязнении грунтовых и поверхностных вод азотом участвуют различные источники.

4.6. Получение экологически безопасной продукции при выращивании сельскохозяйственных культур на черноземных почвах

Для получения экологически безопасной продукции в условиях черноземных почв необходимо соблюдение комплекса агротехнологий, обеспечивающих оптимальное накопление в урожае возделываемых культур веществ, определяющих пищевую ценность и нормативное содержание загрязняющих веществ.

Важнейшим условием получения продукции высокого качества по комплексу показателей является система удобрений в севообороте. Минеральные и органические удобрения обеспечивают сбалансированное потребление элементов питания и их участие в продукционном процессе растений на протяжении всего периода вегетации. Нарушение соотношения N:P:K в удобрениях ведет к снижению накопления запасных веществ в урожае и к усилению поступления загрязняющих веществ в растения.

В зерне озимой пшеницы содержалось наибольшее количество сырого белка при ее выращивании по чистому пару и внесении полного минерального удобрения (азот N₆₀ в подкормку) [Доманов, 1995] (табл. 135). Однако в условиях чернозема типичного (Тамбовская обл.) озимая пшеница формировала урожай с наибольшим содержанием сырого белка в зерне (13,0%) при ее выращивании по сидеральному пару и применении полного минерального удобрения (N₉₀P₉₀K₉₀) [Юмашев, 2011]. В этих же условиях озимая пшеница сорта Московская 39 формировала зерно с большим содержанием сырого белка (на 2,0%) при ее выращивании по чистому пару по сравнению с сортом Губернатор Дона [Иванова, 2013]. Наибольшее количество сырого белка в зерне пшеницы (16,6%) содержалось при ее выращивании после гороха (чернозем типичный, Тамбовская обл.) [Макаров, 1990].

В условиях выщелоченного чернозема (Кабардино-Балкария) применение удобрений в севообороте под озимую пшеницу оказало положительное влияние на питательный режим почвы (N_{мин.} 38-62, P₂O₅ 73-102, K₂O 144-158 мг/кг), что повышало урожайность и изменяло качество зерна (табл. 136).

Таблица 135. Продуктивность и качество зерна озимой пшеницы в зависимости от условий выращивания

| Почва, область | Предшественник | Удобрения, кг/га | Урожайность зерна, ц/га | Сырой белок, % | Автор, год |
|---|----------------------------------|---|-------------------------|----------------|---------------------|
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | Горох | $N_{55}P_{55}K_{52}$ | 34,3 | 16,6 | Макаров, 1985, 1990 |
| Чернозем типичный и выщелоченный, Белгородская обл. | Вико-овес | $P_{60}K_{60}+N_{120}$ | 45,7 | 12,3 | Доманов, 1995 |
| | Кукуруза з/м | $P_{60}K_{60}+N_{90}$ | 46,1 | 12,2 | |
| | Чистый пар | $P_{60}K_{60}+N_{60}$ | 46,3 | 12,9 | |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | Чистый пар, эспарцет | $P_{60}K_{60}+N_{60}$ | 34,4 | 15,3 | Галицкий, 2012 |
| Чернозем типичный и выщелоченный, Тамбовская обл. | Сидеральный пар | $N_{90}P_{90}K_{90}$ | 45,3 | 13,0 | Юмашев, 2011 |
| | Чистый пар | $N_{90}P_{90}K_{90}$ | 42,2 | 12,1 | |
| Чернозем типичный, Тамбовская обл. | Чистый пар, сорт Московская 39 | $N_{90}P_{40}K_{40}$ | 25,6 | 17,0 | Иванова, 2013 |
| | Чистый пар, сорт Губернатор Дона | $N_{90}P_{40}K_{40}$ | 36,0 | 15,0 | |
| Чернозем выщелоченный, Кабардино-Балкария | Чистый пар, Донская юбилейная | $N_{50-150}P_{40-120}K_{40-120}$ | 53,9 | 15,1 | Кануков и др., 2008 |
| | | Навоз (последействе)+ $N_{50}P_{40}K_{40}$ | 52,2 | 14,7 | |

Таблица 136. Влияние удобрений на качество зерна озимой пшеницы [Кануков и др., 2008]

| Вариант | Урожай, ц/га | Сырой белок | Сырой жир | Сырая клетчатка | Зола | Масса 1000 зерен, г | Натура, г/л | Стекло видность, % | Сырая клейковина | | | Сила муки (седиментация), ед. |
|----------------|--------------|--------------------|-----------|-----------------|------|---------------------|-------------|--------------------|------------------|-----|-----------------|-------------------------------|
| | | % в сухом веществе | | | | | | | содержание, % | ИДК | Группа качества | |
| б/у | 24,1 | 13,0 | 2,15 | 3,60 | 2,13 | 31,5 | 755 | 48 | 25,8 | 87 | II | 31 |
| $N_1P_1K_1^*$ | 35,7 | 13,7 | 1,83 | 3,49 | 2,13 | 33,0 | 764 | 53 | 27,9 | 81 | II | 32 |
| $N_2P_1K_1$ | 38,6 | 14,3 | 1,85 | 3,49 | 2,15 | 32,3 | 749 | 54 | 28,7 | 83 | II | 36 |
| $N_3P_1K_1$ | 42,1 | 13,9 | 2,03 | 3,52 | 2,17 | 33,0 | 754 | 52 | 27,0 | 83 | II | 32 |
| $N_4P_1K_1$ | 50,1 | 14,4 | 2,11 | 3,53 | 2,17 | 34,1 | 750 | 54 | 29,3 | 85 | II | 37 |
| $N_5P_2K_2$ | 53,9 | 14,4 | 1,96 | 3,58 | 2,20 | 34,4 | 752 | 55 | 28,9 | 76 | I | 34 |
| $N_6P_2K_1$ | 45,3 | 14,8 | 1,99 | 3,53 | 2,20 | 32,7 | 746 | 61 | 30,1 | 87 | II | 36 |
| $N_7P_2K_2$ | 48,5 | 14,8 | 2,03 | 3,54 | 2,21 | 31,2 | 753 | 60 | 29,6 | 80 | II | 35 |
| $N_8P_2K_1$ | 47,3 | 14,6 | 1,88 | 3,56 | 2,20 | 32,0 | 760 | 60 | 29,0 | 90 | II | 34 |
| $N_9P_2K_2$ | 49,4 | 14,6 | 2,26 | 3,59 | 2,22 | 31,8 | 758 | 58 | 29,4 | 84 | II | 35 |
| $N_{10}P_3K_1$ | 48,2 | 14,9 | 1,89 | 3,58 | 2,21 | 31,3 | 744 | 60 | 30,5 | 92 | II | 33 |
| $N_{11}P_3K_3$ | 52,0 | 15,0 | 2,13 | 3,62 | 2,24 | 31,9 | 748 | 61 | 30,8 | 82 | II | 37 |
| H+NPK | 52,2 | 14,7 | 2,32 | 3,60 | 2,16 | 33,5 | 760 | 56 | 28,5 | 73 | I | 40 |
| Расч-й** | 49,9 | 15,1 | 1,91 | 3,43 | 2,21 | 32,7 | 755 | 59 | 30,0 | 78 | I | 38 |

* Одинарная доза $N_{50}P_{40}K_{40}$

** Расчетная доза $N_{110}P_{90}K_{70}$

С увеличением дозы азота до 100 кг/га (на фоне $P_{80}K_{40}$) повышался урожай зерна на 11,5 ц/га по сравнению с одинарной дозой (50 кг/га). Дальнейшее повышение дозы азота до 150 кг/га сопровождалось снижением урожая зерна на 4,8 ц/га по сравнению с предыдущей дозой азота (100 кг/га).

Максимальное количество сырого белка в зерне (15,1%) содержалось при внесении 150 кг N/га когда проводилась некорневая подкормка мочевиной в фазу цветения-колёшения [Кануков и др., 2008]. Под действием возрастающих доз азотных удобрений повышалось содержание сырого белка, сырой клейковины, масса 1000 зерен, стекловидность и сила муки; снижались содержание жира и клетчатки и не менялась зольность.

Применение бактериальных препаратов (БП) со штаммами ассоциативных микроорганизмов флавобактерин 30 и 18,5 в условиях обыкновенного чернозема (Ростовская обл.) повышало урожайность клубней картофеля и содержание крахмала в них (табл. 137). Максимальное количество крахмала содержали клубни при внесении БП-30 на фоне $N_{60}P_{60}K_{60}$ [Агафонов и др., 2013].

Таблица 137. Влияние минеральных удобрений и бактериальных препаратов на урожайность картофеля и содержание крахмала в клубнях [Агафонов и др., 2013]

| Вариант | Урожайность клубней, ц/га | Содержание крахмала | |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------|----------|
| | | % | прибавка |
| Контроль, б/у | 124 | 19,2 | - |
| $N_{60}P_{60}K_{60}$ | 136 | 19,8 | 0,6 |
| $N_{60}P_{60}K_{60}$ + БП30 | 139 | 19,9 | 0,7 |
| $N_{60}P_{60}K_{60}$ + БП 18-5 | 150 | 19,7 | 0,5 |

В зернопропашном севообороте на черноземе обыкновенном (Краснодарский край) подсолнечник формировал наибольший урожай семян с высоким содержанием жира при внесении азота (40 кг/га) на фоне P_{60} (табл. 138).

Высокой масличностью отличались семена подсолнечника при внесении азотных и фосфорных удобрений ($N_{40}P_{60}$) на фоне последствия навоза [Баршадская и др., 2011].

Таблица 138. Влияние удобрений на урожайность и масличность семян подсолнечника [Баршадская и др., 2011]

| Вариант | Урожайность клубней, ц/га | Содержание масла | |
|-------------------------------------|---------------------------|------------------|----------|
| | | % | прибавка |
| Контроль, Б/у | 24,1 | 44,7 | - |
| $N_{40}P_{60}$ | 28,3 | 47,0 | 2,3 |
| Последствие навоза + $N_{40}P_{60}$ | 28,7 | 46,0 | 1,3 |

В результате длительного применения удобрений (35 лет) в условиях чернозема типичного (Воронежская обл.) содержание цинка, свинца, кадмия, меди и марганца в зерне озимой пшеницы снижалось, а никеля – не менялось (табл. 139). Под действием возрастающих доз минеральных удобрений

содержание цинка и свинца в корнеплодах и ботве сахарной свеклы снижалось при дозе по 60 кг/га, а затем увеличивалось при дозе по 120 кг/га; содержание марганца при этом постоянно снижалось [Мязин и др., 2006]. В то же время содержание меди сначала росло, а затем снижалось, тогда как количество кадмия возрастало при дозе $N_{60} P_{60} K_{60}$ и дальше не менялось.

Таблица 139. Содержание микроэлементов в растениях на черноземе типичном, мг/кг абсолютно сухой массы [Мязин и др., 2006]

| Вариант | Zn | Pb | Cd | Cu | Ni | Mn |
|---------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Озимая пшеница | | | | | | |
| Б/у (контроль) | 33,9/49,3 | 1,8/1,7 | 0,3/0,5 | 3,7/3,1 | 1,2/1,4 | 38,4/43,1 |
| $N_{60} P_{60} K_{60}$ | 33,0/46,4 | 1,3/1,6 | 0,2/0,4 | 2,8/2,5 | 1,2/1,3 | 31,1/37,6 |
| $N_{120} P_{120} K_{120}$ | 32,3/46,5 | 1,2/1,4 | 0,2/0,3 | 2,8/2,5 | 1,1/1,3 | 33,6/36,2 |
| Сахарная свекла | | | | | | |
| Б/у (контроль) | 266/49,0 | 8,8/2,3 | 1,4/0,5 | 5,7/2,7 | 6,8/3,3 | 122/53,0 |
| $N_{60} P_{60} K_{60}$ | 177/26,3 | 5,5/3,1 | 1,1/0,7 | 5,6/4,2 | 5,8/6,0 | 96,1/45,5 |
| $N_{120} P_{120} K_{120}$ | 109/43,5 | 6,9/3,9 | 1,2/0,7 | 5,9/3,0 | 7,2/6,0 | 89,2/45,5 |

Накопление нитратов в растениях является естественным физиологическим процессом, свойственным растительному организму, и представляет собой систему последовательных звеньев образования NO_3^- в почве, поглощения и ассимиляции, распределения по органам и тканям, а также в клетке (активный и запасной пул). Размеры накопления NO_3^- в растениях сопряжены с внутрипочвенным циклом азота, общим метаболизмом растительного организма и факторами окружающей среды [Соколов и др., 1990]. К числу основных условий, вызывающих накопление NO_3^- в растениях, относятся биологические особенности возделываемой культуры, режим минерального питания, факторы окружающей среды, которые в свою очередь объединяют видовые различия, сортовую специфику, возраст растений, характер распределения нитратов по органам, тканям и клеткам, уровень азотного питания, соотношение $NO_3^-: NH_4^+$ в почве, степень сбалансированности соотношения N:P:K и микроэлементов и их доступность растениями, уровень плодородия почвы, температуру и влажность почвы, интенсивность и продолжительность солнечного сияния.

Минеральные и органические удобрения близки или тождественны природным соединениям и целенаправленно вносятся в почву для включения в биологический цикл системы почва-растение. Увеличение масштабов применения азотных удобрений необходимо, поскольку естественный круговорот азота не может восполнить его вынос с урожаем сельскохозяйственных культур. Однако при оценке действия азотных удобрений зачастую основное внимание уделяется агрономическим и экономическим аспектам их эффективности, которые не всегда соответствуют экологической целесообразности их применения и получения экологически безопасной продукции. Негативные последствия применения высоких и несбалансированных доз азотных удобрений проявляется, с одной стороны, в избыточном поступлении азотных соединений в водоемы и грунтовые воды, а с другой – в увеличении накопления нитратов в овощных, технических и кормовых культурах,

усилении поражаемости растений болезнями и вредителями, неравномерном созревании урожая и снижении его устойчивости при транспортировке и хранении.

При выращивании сельскохозяйственных культур в различных регионах страны при интенсивном применении азотных удобрений содержание NO_3^- в продукции возрастает в 4-24 раза [Соколов и др., 1990]. Это увеличение происходит в основном за счет азота почвы. Так, в условиях оподзоленного чернозема (Новосибирская обл.) содержание NO_3^- в корнеплодах моркови снижалось при последствии торфа на 37% по сравнению с РК (табл. 140).

Таблица 140. Накопление нитратов в корнеплодах моркови из почвы, торфа и азотных удобрений (меченных ^{15}N) [Назарюк, 2004]

| Вариант | Нитраты | |
|-------------------------|---------------|-------------------|
| | почвы и торфа | азотных удобрений |
| РК | 804/100 | - |
| РК + торф (Фон) | 510/100 | - |
| Фон + $^{15}\text{N}_1$ | *522/62 | 321/38 |
| Фон + $^{15}\text{N}_2$ | 1041/82 | 850/18 |

* Числитель: нитраты, мг/кг; знаменатель: нитраты, % от общего содержания.

Применение азотных удобрений (меченных ^{15}N) повышало содержание нитратов в корнеплодах, при этом за счет удобрений накапливалось 38% нитратов. При повышении дозы азота в 2 раза количество NO_3^- в корнеплодах увеличивалось в 2 раза, при этом доля азота удобрения в нитратах снижалась более чем в 2 раза, поскольку увеличение их в корнеплодах происходило за счет нитратов почвы. Аналогичные результаты были получены на серых лесных почвах (Московская обл.) при внесении меченных ^{15}N азотных удобрений под овощные культуры [Соколов, 1990]. Таким образом, в накоплении нитратов в растениях основное участие принимает азот почвы. Азот удобрения способствует усилению дополнительного включения азота почвы в нитраты в растениях. Дополнительный азот почвы приводит к образованию «экстра»-нитратов.

При выращивании сельскохозяйственных культур на черноземных почвах наибольшее количество нитратов накапливает целый ряд культур, мг/кг: амарант (21180), салат (1900), редис (1400), шпинат (1550), кукуруза з/м (1324), лук (1248) (табл. 141). Минимальное количество NO_3^- могут накапливать следующие культуры: томаты (25), морковь (44), картофель (51). Под действием азотных удобрений содержание NO_3^- в урожае сельскохозяйственных культур колеблется в широких пределах: от 1,4 раза у томатов, до 8 раз у шпината и кукурузы з/м и до 16 раз у салата. Столь высокая пластичность растений накапливать NO_3^- в урожае объясняется действием множества факторов на этот процесс.

Систематическое применение жидкого навоза и минеральных азотных удобрений в севообороте (чернозем типичный, Белгородская обл.) усиливало накопление NO_3^- в урожае возделываемых культур. При внесении в 3-й ротации жидкого навоза (180 кг N/га) содержание NO_3^- в кукурузе з/м повысилось на 21 мг/кг и на 180 мг/кг в корнеплодах кормовой свеклы по

сравнению с их содержанием в культурах первой ротации [Шелганов, 1998]. При внесении в той же дозе минеральных удобрений содержание NO_3^- в кукурузе повышалось на 731 мг/кг и на 674 мг/кг в корнеплодах кормовой свеклы.

Таблица 141. Содержание нитратов в основной продукции сельскохозяйственных культур

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Содержание NO_3^- , мг/кг сырого вещества | Автор, год |
|---|----------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Амарант | N_{aa}^* 60, 80 | 872-2118 | Андрианова, Барсуков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Вика, з/м | N_{aa}^* 60, 80 | 85-144 | Андрианова, Барсуков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Горох, з/м | N_{aa}^* 60 | 129-239 | Андрианова, Барсукова, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Орловская обл. | Дайкон | N_m^* 6,5 г/сосуд | 88-487 | Амелин, 2001 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Капуста бело-кочанная | N_{aa}^* 135; T40 т/га | 122-551 | Назарюк, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N_{aa}^* 60, T20, 40 т/га | 122-644 | Назарюк, 2004 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Картофель | N_{aa}^* 30; T50 т/га | 51-104 | Назарюк, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N_{aa}^* 30, T25, 50 т/га | 51-118 | Назарюк, 2004 |
| Чернозем выщелоченный, Тамбовская обл. | Кострец, люцерна | Навозные стоки, N_{300} | 281-294 | Грислис, 1993 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Кукуруза, з/м | N_{aa}^* 80 | 110-295 | Андрианова, Барсуков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Орловская обл. | | N_m^* 6,5 г/сосуд | 166-1324 | Амелин, 2001 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Лук | N_{aa}^* 60, 120 | 63-1248 | Назарюк, 2004 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Люпин узколистный | N_{aa}^* 30-80 | 116-178 | Андрианова, Барсуков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Морковь | N_{aa}^* 40; T50 т/га | 44-100 | Назарюк, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N_{aa}^* 60; T20, 40 т/га | 44-210 | Назарюк, 2004 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Овес, зеленая масса | N_{aa}^* 60, 80 | 201-415 | Андрианова, Барсукова, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N_{aa}^* 60; T60 т/га | 87-151 | Назарюк, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N_{aa}^* 60; T30,60 т/га | 85-159 | Назарюк, 2004 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Озимая рожь, зеленая масса | N_{aa}^* 80 | 70-130 | Андрианова, Барсуков, 1998 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | Озимая пшеница (солома) | N_{aa}^* 50, H30 т/га | 136-180 | Мязин и др., 2006 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Просо**, зеленая масса | N_{aa}^* 80 | 95-113 | Андрианова, Барсуков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Рапс**, зеленая масса | N_{aa}^* 60 | 108-376 | Андрианова, Барсуков, 1998 |

Окончание табл. 141

| Почва, регион | Культура | Форма и доза азотного удобрения | Содержание NO_3^- , мг/кг сырого вещества | Автор, год |
|---|--------------------------------|---|--|----------------------------|
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Редис | N_{aa} , 200,400,800 | 250-1400 | Назарюк, 2004 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Салат | N_{aa} , 200,400,800 | 120-1900 | Назарюк, 2004 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | Свекла сахарная | N_{aa} , 90, 230 | 220/130-630/250 | Мязин, 1994 |
| Чернозем обыкновенный, Воронежская обл. | | N_{aa} , 120; H40 т/га | 557/1480-438/762 | Супрун, 2008 |
| Чернозем типичный, Воронежская обл. | | N_{aa} , 90, 180, H30 т/га | 148/281-53/117 | Мязин и др., 2006 |
| Чернозем выщелоченный, Томская обл. | Суданская трава, зеленая масса | N_{aa} , 60, 80 | 272-480 | Андрианова, Барсуков, 1998 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Томат | N_{aa} , 40; T40 т/га | 36-53 | Назарюк, 1988 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | | N_{aa} , 60; T20,40 т/га | 25-55 | Назарюк, 2004 |
| Чернозем выщелоченный, Новосибирская обл. | Шпинат | N_{aa} , 200,400,800 | 200-1550 | Назарюк, 2004 |

Подтверждением тому служит действие возрастающих доз азотных удобрений на содержание NO_3^- в ботве сахарной свеклы (чернозем выщелоченный, Белгородская обл.) при различных условиях увлажнения (табл. 142).

Таблица 142. Влияние погодных условий и удобрений на содержание нитратов в ботве сахарной свеклы на фоне навоза, мг/кг [Богомазов, 1994]

| ГТК | Доза азота, кг/га | | | |
|------|-------------------|------|------|------|
| | 0 | 90 | 180 | 270 |
| 0,50 | 1362 | 1691 | 2432 | 3919 |
| 0,75 | 1070 | 1245 | 1912 | 2660 |
| 1,00 | 653 | 698 | 1311 | 2018 |
| 1,25 | 156 | 187 | 652 | 1323 |

При различных погодных условиях под действием азотных удобрений содержание NO_3^- в ботве свеклы изменялось в 3-9 раз, наиболее заметно при дозе удобрения 90 кг N/га. Содержание нитратов в ботве свеклы снижалось с ростом влагообеспеченности с 1362 до 156 мг/кг, т.е. в 8,7 раза без применения удобрений и в 3-9 раз на фоне внесения удобрений [Богомазов, 1994]. Использовать ботву на корм скоту в свежем виде в период массовой уборки сахарной свеклы в засушливых условиях нельзя ввиду очень высокого содержания NO_3^- в ней. Ее можно использовать только после силосования. Содержание нитратов в зеленой массе кукурузы (на безнавозном фоне) повышалось с ростом ГТК от 51 до 228 мг/кг [Богомазов, 1994]. Азотные удобрения повышали содержание NO_3^- в кукурузе при ГТК 0,75 от 51 до 177 мг/кг на безнавозном фоне и от 328 до 364 мг/кг на фоне последствия навоза.

Заключение

Азот в черноземных почвах на 97-98% представлен органическими соединениями. Наибольшее количество азота (до 28 т/га) находится в черноземах обыкновенных. При длительном сельскохозяйственном использовании в верхнем слое 0-10 см чернозема обыкновенного (Каменная Степь, Воронежская обл.) (70 лет) содержание общего азота снизилось на 34%. Обыкновенный чернозем Краснодарского края по запасам гумуса в пахотном слое не уступает другим подтипам черноземов, а по содержанию общего азота и по его запасам в слое 150 см он уступает типичным и выщелоченным подтипам. Содержание азота в черноземных почвах колеблется в широких пределах: от 0,087% в черноземовидной глинисто-песчаной почве (Галле, Германия) до 0,643% в выщелоченном тяжелосуглинистом черноземе (Мордовия, Россия). По запасам общего азота черноземы Предуралья значительно превосходят черноземы Центрального Черноземья. Отличие черноземов Восточной Сибири состоит в укороченности гумусового профиля и в меньших запасах гумуса, в повышенном содержании гумуса и азота в пахотном слое, в более узком соотношении C:N.

Азот, входящий в состав органического вещества, находится в различной форме связей с его молекулами. Для черноземов характерно относительно высокое содержание гуминовых соединений (преимущественно во 2-й фракции). У чернозема типичного содержится большее количество азота негидролизуемого остатка (36,6% от общего азота). Основная часть азота входит в состав гумусовых веществ, преобладающей в органическом веществе формой является азот гуминов. В черноземах на подвижные соединения азота приходится 4% от общих его запасов. Соединения органического азота в основном представлены аминокислотами. В форме аминокислот находится одна треть почвенного азота. Наибольшую долю в запасе азота аминокислот (47-67%) пахотного чернозема занимают шесть аминокислот: аланин, аспарагиновая кислота, глицин, аргинин, глутаминовая кислота и серин. Использование чернозема в течение 23 лет привело к снижению запасов азота аминокислот в 2-3 раза.

Типичные черноземы Центрального Черноземья отличаются наибольшим количеством минерального и легкогидролизуемого азота. Наибольшая подвижность соединений азота характерна для оподзоленных и выщелоченных черноземов Центрального Черноземья. В типичных и обыкновенных черноземах низкое содержание гидролизующихся соединений азота обусловлено составом гумуса. Для черноземов лесостепи Поволжья характерна высокая доля трудногидролизующихся соединений (26%) и низкая доля легкоги-

дрозуемого (6%) и негидролизуемого азота (68%). При длительном использовании чернозема обыкновенного снижается абсолютное количество фракции азота по всему профилю почвы. Азот в черноземах Башкортостана представлен в основном негидролизуемыми соединениями (79-82% от общего азота). В отличие от черноземов ЦЧР, основные запасы азота в черноземах Западной Сибири (до 70%) сосредоточены в верхнем 50сантиметровом слое. Наибольшими запасами легкогидролизуемого азота обладает профиль типичного и обыкновенного черноземов Центрального Черноземья, минимальное его количество содержится в черноземах южных. Повышенным содержанием обменного аммония и нитратов отличается пахотный слой чернозема типичного и выщелоченного, минимальным – чернозем южный. В пахотном слое чернозема типичного содержится большее количество фиксированного (необменного) аммония. При длительном использовании черноземов количество минерального азота возрастает.

Доля симбиотического азота в земледелии в Центральном Черноземье составила 56%. При этом выращиваемые культуры использовали 33% симбиотического азота, в почве его закрепляется 38%, а газообразные потери составили 29% от общего количества. В условиях черноземов Западной Сибири микробными ассоциациями фиксируется 22-65 кг N/га. В зависимости от характера действия природных и антропогенных факторов меняется структура микробоценоза, изменяется развитие и соотношение микроорганизмов, тяготеющих к использованию K- или r- стратегии. Изменение в структуре микробоценоза влияет на процессы мобилизации и иммобилизации почвенного азота. Гетеротрофная микрофлора временно выводит часть азота из сферы азотного питания растений, препятствует его потерям. Характер использования иммобилизованного азота растениями определяется величиной потока его через микробную биомассу, который пропорционален произведению запаса азота в биомассе на скорость ее оборачиваемости. При максимальной антропогенной нагрузке (бессменный пар) содержание азота биомассы микроорганизмов в 50сантиметровом слое почвы снижается в 2 раза по сравнению с залежью. Наибольшего развития микроорганизмы азотного цикла (аммонификаторы, денитрификаторы) достигали при органической системе удобрения. Запасы азота микробной биомассы существенно возрастают во второй половине июня. Запасы микробного азота в 10сантиметровом слое выщелоченного чернозема (Новосибирская обл.) достигают 17-61 кг N/га. Через микробную биомассу в почве проходит поток азота, в 2-3 раза превышающий ежегодный вынос его с урожаем сельскохозяйственных культур.

Накопление азотсодержащих органических соединений в почвах разного типа и активность гидролитических ферментов азотного обмена представляют собой единый процесс, определяющий уровень плодородия и устойчивости почв. Активность протеазы и уреазы может быть диагностическим показателем биологической активности почв, поскольку обуславливает уровень мобильного азота.

Под действием низких доз азотных удобрений активность протеазы повышается, высоких доз – подавляется. Ферментативная активность различных типов почв неодинакова и связана с их генетическими особенностями

и комплексом экологических факторов. Изменение активности протеаз по профилю почвы сопряжено с распределением гумуса и общей биологической активностью. Под действием органических удобрений возрастает протеолитическая и уреазная активность почвы. Изменения интенсивности биохимических процессов в почве прослеживаются только при длительном систематическом применении удобрений.

Черноземы, занимая 9% площади в пределах СНГ, составляют основу пахотного фонда (60%) и производства товарного зерна (80%). На западно-предкавказских сверхмощных и мощных малогумусных и среднегумусных черноземах (3% сельскохозяйственных угодий России) производится 16% высококачественного зерна озимой пшеницы, 40% ячменя, 30% подсолнечного масла и 25% сахара.

Антропогенез оказывает существенное воздействие на состав и состояние воды, видовой состав и активность микробиоценоза, трансформацию органических веществ, морфогенетические признаки и устойчивость черноземных почв. Под действием природных и антропогенных факторов происходит эволюция черноземов: т.е. происходят количественные и качественные изменения их состава, биогеохимического круговорота веществ и энергии. Наиболее сильные изменения в составе черноземов происходят под действием антропогенных факторов.

Органическое вещество черноземных почв является динамичной системой. Лабильные формы гумусовых веществ перераспределяются по профилю почвы в зависимости от: количества и состава поступающего растительного материала, интенсивности минерализации, морфогенеза подстилающей породы и режима увлажнения. За 50 лет в черноземах Кубани содержание гумуса в верхнем 8сантиметровом слое почвы снизилось на 1,94%, тогда как в слое 40-45 см – на 1,18%, содержание азота – на 0,09 и 0,04% соответственно. За 11 лет использования чернозема типичного (Белгородская обл.) содержание гумуса в верхнем 20сантиметровом слое снизилось на 0,09%, тогда как в подпахотном слое (20-40 см) его количество увеличилось на 0,18%, что связано со «стеканием» гумуса. В последующем, благодаря освоению адаптивно-ландшафтной системы земледелия, за 9 лет содержание гумуса в пахотном и подпахотном слоях увеличилось на 0,30% и 0,75% соответственно. В связи с этим при оценке потерь гумуса и азота в процессе длительного использования черноземных почв необходимо учитывать их запасы не только в пахотном, но и в подпахотном слое, азот которого используется возделываемыми культурами.

Падение содержания запасов азота в черноземных почвах происходит вследствие усиления минерализации органического вещества почвы при длительном применении минеральных удобрений и интенсивной обработке; снижения объемов применения органических и минеральных удобрений; уменьшения количества растительных остатков из-за снижения объемов применения удобрений; нарушения баланса азота между отчуждением его с урожаем возделываемых культур и поступлением в почву; физико-химической и биологической деградации гумуса под действием физиологически кислых удобрений; снижения поступления биомассы сорной растительности; снижения биоразнообразия почвенной биоты; развития эрозии

онных процессов; интенсификации миграционных процессов в результате длительного орошения.

Таким образом, потери содержания и запаса гумуса и азота ведут к снижению плодородия черноземных почв, что негативно сказывается на производстве растениеводческой и животноводческой продукции, снижении ее качества, ухудшении состояния окружающей природной среды.

Наибольшим сезонным изменениям в черноземных почвах подвержены минеральные формы азота. По динамике изменения запасов минерального азота в почве определяют обеспеченность возделываемых культур азотом и уровень их продуктивности, а также изменение качества урожая. По уровню запасов минерального азота в почве судят об опасности загрязнения продукции нитратами, о газообразных потерях азота, а также о поступлении азотистых соединений в природные грунтовые и поверхностные воды.

Ближайший резерв доступного растениями азота сосредоточен в активном пуле органического вещества, основным компонентом которого является азот микробной биомассы. Содержание минерального азота в почве зависит одновременно от размера его образования и от степени расходования. Количественным критерием круговорота азота в экосистеме служит азотминерализующая способность черноземов. Процессы нитрификации и накопления NO_3^- в почве зависят от свойств почвы, метеорологических условий и агротехнологий выращивания сельскохозяйственных культур.

Количество нитратов в 60-сантиметровом слое почвы служит достоверной характеристикой обеспеченности растений азотом на протяжении всего периода вегетации. При выращивании озимой пшеницы на черноземе выщелоченном (Краснодарский край) наибольшее количество минерального азота в 60-сантиметровом слое накапливается осенью, уменьшается к весне до полного исчезновения в фазу колошения и несколько повышается к периоду полной спелости зерна. Однако в метровом слое выщелоченного чернозема (Краснодарский край) содержание NO_3^- к концу июня возрастает, что, по-видимому, вызвано восходящим током почвенной влаги. На динамику содержания NO_3^- и NH_4^+ в почве существенное влияние оказывают лесные полосы.

Содержание азота нитратов в черноземе обыкновенном при выращивании сахарной свеклы снижалось от весны к августу. Использование навоза и минеральных удобрений создавало условия максимальной мобилизации почвенного азота. При осеннем внесении натриевой селитры (меченой ^{15}N) сахарная свекла в процессе роста использует 31% азота удобрения, в почве закрепляется 22%, теряется 47% азота удобрения. Высокие потери азота удобрения обусловлены тем, что основное его количество (31%) теряется до посева сахарной свеклы.

В годичном цикле содержание минерального азота меняется в зависимости от вида возделываемой культуры в севообороте. Наибольшее количество нитратного и аммонийного азота в выщелоченном черноземе накапливалось в паровом поле, затем их содержание снижается к замыкающей севооборот культуре. Характер изменения пула минерального азота тесно связан с климатическими условиями зоны и генетическими особенностями почв. В начале периода вегетации в черноземе выщелоченном (Башкортостан)

стан) характер этой связи прямой, в дальнейшем, в ходе вегетации растений, количество минерального азота обратно пропорционально среднесуточной температуре воздуха. Положительное действие на накопление минерального азота в черноземе обыкновенном оказывает температура в период сева полевых культур. Однако в конце периода вегетации количество минерального азота обратно пропорционально запасам продуктивной влаги в почве.

В отличие от других элементов, азот обладает большим разнообразием соединений, мобильностью, способностью быстрой трансформации, которая определяется тепловым и водным режимами почвы, характером растительного покрова, уровнем применения органических и минеральных удобрений.

Оптимизация содержания гумуса и различных форм азота в почве достигается системой удобрения. При длительном применении удобрений повышается содержание общего азота на 4-16% и минеральных его форм на 5-17%. Азот аммиачной селитры повышает содержание минерального азота, тогда как азот навоза увеличивает количество легкогидролизуемой формы. Азотные удобрения повышают запасы минерального азота в 200 сантиметровом слое почвы на протяжении всего периода вегетации растений. При длительном применении органических и минеральных удобрений возрастает содержание легкогидролизуемого азота (на 108-139%) в пахотном слое и на 46-66% в слое 20-40 см; содержание трудногидролизуемого азота увеличивается на 27-52% в слое 0-20 см и на 40-57% в слое 20-40 см; количество негидролизуемого азота снижается, что свидетельствует о большей доступности соединений азота растениям. Органические и минеральные удобрения усиливают на 11-25% потребление азота растениями. С увеличением доз азотных удобрений растет миграция NO_3^- в глубокие слои почвенного профиля черноземов.

В накоплении органического вещества в почве активное участие принимает азот минеральных удобрений. При внесении азотных удобрений в почве устанавливается динамическое равновесие иммобилизация D минерализация D реиммобилизация, результатом которого является размер иммобилизованного азота. Иммобилизация азота тесно связана с его участием в физических, физико-химических и биологических процессах, одновременно протекающих в твердой, живой, жидкой и газовой фазах почвы.

При выращивании озимых зерновых культур в почве закрепляется 23-25% азота удобрения, при выращивании яровых зерновых – 18-48%. Минимальное количество азота удобрения закрепляется в черноземах при выращивании картофеля (13-17%), максимальное – риса – 60%, при выращивании остальных культур – в пределах 33-38% 60% от применяемой дозы.

В отличие от дерново-подзолистых почв в черноземах вновь иммобилизованный азот удобрения (^{15}N) в большей степени (32%) закрепляется в гуминовых кислотах (фракция 2); при этом снижается закрепление ^{15}N в фульвокислотах. При внесении повышенных доз азотных удобрений (100-200 кг N/га) процессы трансформации иммобилизованного меченого азота направлены на увеличение количества ^{15}N в сложных гумусовых соединениях. Снижение количества ^{15}N в отгоняемых соединениях легко- и трудно-

гидролизуемого азота свидетельствует о большей мобильности вновь образованной части этих фракций.

Степень использования иммобилизованного азота удобрения растениями в первый год последействия составляет 1,8-8,2% от применяемой дозы азота и резко снижается на второй год последействия (0,7-0,9%). Реминерализация органического ^{15}N в черноземе типичном идет быстрее в тех фракциях, органические соединения которых минерализуются легче (фракция 2 в гуминовых кислотах и фракции 1а, 1, 2 в фульвокислотах).

Содержание общего азота в черноземах под действием навоза повышается на 13-25%, под действием минеральных удобрений – на 13%. В то же время известно, что при внесении навоза (деградированный чернозем, Ростовская обл.) в течение 10 лет содержание общего азота снижается на 12%, тогда как при внесении минеральных удобрений – на 9%. При длительном использовании черноземных почв происходит обогащение их тяжелым изотопом азота ^{15}N . Иммобилизация азота минеральных удобрений усиливается под действием органических удобрений, тогда как под действием минеральных удобрений снижается иммобилизация ^{15}N органических удобрений. При внесении органических удобрений (биомасса горчицы белой, меченая ^{15}N) агрофитоценоз находится на более высоком уровне экологической устойчивости. Азотные минеральные удобрения несколько снижают устойчивость системы за счет усиления минерализации органического вещества и замедления иммобилизации азота удобрения и азота почвы.

Под действием обработки почвы изменяются ее физико-химические свойства, воздушный, водный и питательный режимы. Длительная обработка черноземов приводит к качественным изменениям гумусовых веществ. При бесплужной обработке накапливается максимальное количество ^{15}N в черноземе типичном, тогда как при отвальной обработке он мигрировал на глубину ниже 60 см. При минимальной обработке снижается обеспеченность растений азотом в начале вегетации, уменьшаются запасы минерального азота по всему почвенному профилю. Органические и минеральные удобрения способствуют более интенсивному развитию микроорганизмов при безотвальной обработке почвы.

Комбинированная система основной обработки почвы в севообороте в сочетании с органическими и минеральными удобрениями улучшает азотный режим чернозема выщелоченного и обеспечивает сохранение гумуса в почве. При минимальной обработке замедляется разложение биомассы растительных остатков и высвобождение азотсодержащих веществ, т.е. снижается их доступность растениям. При традиционной обработке почвы растения лучше (на 27-28%) используют азот удобрения (^{15}N), чем при минимальной системе. Традиционная система обработки снижает газообразные потери азота.

Основная функция растительных остатков и соломы состоит в регуляции потоков углерода и азота в системе почва-растение с агрономическими и экологическими эффектами. Растительные остатки обладают полуфункциональными свойствами, оказывая действие на биологические, химические и физические свойства почвы. Растительные остатки являются источником элементов питания, служат энергетической основой функционирования ми-

кробоценозов, осуществляющих минерализацию и иммобилизацию соединений азота. Наиболее интенсивно в первый год разлагаются растительные остатки редьки масличной, горчицы сарептской; медленнее – остатки подсолнечника, ячменя, озимой пшеницы. На второй год разлагается 19-53% биомассы остатков, на третий – только 6-17%. Растительные остатки стимулируют минерализацию органического вещества почвы и одновременно иммобилизацию минеральных форм азота. Остатки бобовых культур накапливают 11-81 кг/га симбиотического азота. Возделываемые культуры используют 11-28% азота (^{15}N) растительных остатков.

Использование соломы в качестве удобрения является важным элементом биологизации земледелия. По содержанию органического вещества 1 т соломы равноценна 3-4 т навоза крупного рогатого скота. При разложении 1 т соломы в почве образуется 80 кг органического вещества, возвращается в почву 15 кг азота, 8 кг фосфора и 30 кг калия. Максимальное количество лабильных гумусовых кислот накапливалось при внесении гороховой соломы на 210 сутки, и на 360 сутки при внесении пшеничной соломы.

Потребление азота растениями в значительной мере зависит от типа и подтипа почвы, погодных условий, доз и соотношения органических и минеральных удобрений. При выращивании в одинаковых условиях (чернозем выщелоченный, Тульской обл.) зерновых культур без удобрений наибольшее количество азота почвы потребляет овес. Озимая пшеница сорта Губернатор Дона в засушливый год потребляет в 2 раза больше азота, чем растения сорта Московская 39, тогда как в оптимальный год – только в 1,1 раза. Благодаря более высокому уровню плодородия черноземов Краснодарского края озимая пшеница без применения удобрений потребляет значительное количество азота (90-120 кг N/га). На черноземных почвах Центрального Черноземья озимая пшеница без применения удобрений потребляет 70-90 кг N/га. При выращивании яровой пшеницы на черноземах Европейской части страны потребление азота растениями достигает 80-100 кг N/га, тогда как при возделывании ее в Сибири и Зауралье – 50-70 кг N/га, что связано с величиной ее урожайности.

Впервые показано потребление азота сельскохозяйственными культурами при их выращивании на различных подтипах черноземов. Наибольшее количество азота растения потребляют на типичном и выщелоченном черноземах. При определении затрат азота на формирование 1 т продукции отклонения от «Нормативов...» составляют: озимая пшеница – 26-39%, соя – 30%, картофель – 20%, ячмень и сахарная свекла – 27% и т.д.

Для устойчивого функционирования агроэкосистем важным является управление потоками органического и минерального азота в системе почва-растение, представляющими степень использования азота удобрения и азота почвы возделываемыми культурами, уровень иммобилизации его в почве и максимально возможное снижение потерь азота. Чем лучше растения будут использовать и усваивать азот удобрения, тем выше будет агрохимическая эффективность применяемых удобрений и ниже экологическая напряженность в агроландшафте. При выращивании на черноземных почвах растения используют 33-42% азота удобрения от применяемой дозы. Использование азота удобрения растениями зависит от условий выращивания.

Так, сахарная свекла потребляет 14-15% азота удобрения при выращивании ее на выщелоченном черноземе и 49-56% – на черноземе слабовыщелоченном Белгородской области. Также нестабильно использует азот удобрения яровая пшеница: от 26-36% при выращивании на черноземе выщелоченном (Зауралье) до 28-51% – на лугово-черноземной почве (Курганская обл.). В условиях тяжелых лугово-черноземных почв (Краснодарский край) рис использует незначительное количество (17-21%) азота удобрения. При внесении мочевины локально (совместно с семенами) растения использовали до 48% азота удобрения.

При выращивании сельскохозяйственных культур на черноземных почвах при локальном способе внесения азотных удобрений растения использовали 44% азота удобрения, тогда как при традиционном (разбросном) 33%.

В условиях чернозема типичного (Белгородская обл.) озимая пшеница использует азот горчицы белой в 1,4 раза меньше, чем азот мочевины. При совместном внесении биомассы горчицы и мочевины использование ^{15}N горчицы озимой пшеницей возрастает в 1,2 раза, при этом растения потребляли и азота почвы в 1,7 раза больше.

Под действием азотных удобрений усиливается минерализация почвенного органического вещества, в результате чего растения потребляют дополнительное количество азота почвы (экстра-азот). Наибольшее количество экстра-азота усваивали озимая пшеница (30-48% от общего выноса, яровая пшеница потребляла 11-15% дополнительного азота почвы, а кукуруза – 16%).

Вследствие неравномерного распределения азота по профилю почв его поглощение корнями растянуто по времени, в результате чего он оказывает неодинаковое воздействие на обмен веществ, на продуктивность и качество урожая возделываемых культур. Ячмень активно использует азот с 30 см и 60 см глубины за счет лучшего потребления азота почвы, поскольку усвоение азота удобрения, начиная с глубины 60 см, снижается.

Яровые зерновые культуры и сахарная свекла при выращивании их на черноземных почвах используют меньшее количество азота удобрения с глубоких слоев почвенного профиля. Однако при выращивании яровой пшеницы на лугово-черноземной почве растения лучше используют азот из слоя почвы 20-30 см по сравнению с пахотным слоем. При этом слое значительно снижается иммобилизация и возрастают газообразные потери азота удобрения. При выращивании сахарной свеклы с увеличением глубины внесения удобрений снижалась иммобилизация и возрастают газообразные потери азота удобрения.

Эффективность применения азотных удобрений необходимо рассматривать конкретно отдельно для каждой культуры, поскольку не только вид, но и сорта отличаются специфическими признаками азотного питания. Азотные удобрения в засушливый год повышали урожай зерна озимой пшеницы сорта Московская 39 на 3,2 ц/га, а у сорта Губернатор Дона – на 4,4 ц/га. В благоприятный год азотные удобрения повышали урожай зерна на 10,8 ц/га у обоих сортов. Азотные удобрения (чернозем выщелоченный, Краснодарский край) повышали урожай зерна озимой пшеницы в благоприятном году на 28 ц/га, в неблагоприятном году – на 15,7 ц/га.

В условиях Центрального Черноземья азотные удобрения повышают урожай зерна яровой пшеницы на 12-58% в зависимости от погодных условий. На выщелоченном черноземе (Краснодарский край) азотные удобрения увеличивают урожай зерна на 10,1 ц/га после зернового предшественника и на 29,0 ц/га по пару.

Наибольшая прибавка урожая зерна (36%) у озимой ржи получена на типичном черноземе Центрального Черноземья. Оплата 1 кг азота прибавкой урожая составила 6,9 кг зерна. При формировании урожая зерна 44,9 ц/га оплата 1 кг азота прибавкой урожая зерна у ячменя составила почти 15 кг зерна. Азотные удобрения повышают урожай зерна овса на 21-30%, урожай клубней картофеля – на 12-14%, корнеплодов сахарной свеклы – на 24%.

Экологические аспекты потоков азота в черноземных почвах затрагивают функционирование микробных сообществ в его трансформации, потери элемента в процессе водной эрозии, газообразные потери азота удобрения и азота почвы, эмиссию парниковых газов, загрязнение природных вод и продукции нитратами.

Черноземные почвы – это сложные многокомпонентные образования с высокой степенью пространственно-временной изменчивости, которую определяет структурно-функциональная организация микробных сообществ. Черноземные почвы имеют свой набор микробоценозов, свой состав трансформируемых веществ и свой предел устойчивости. Длительное применение минеральных удобрений не оказывает существенного влияния на таксономическую структуру и разнообразие почвенного микробиоценоза. Длительное использование чернозема типичного (более 20-ти лет) снижает в 1,4-1,9 раза запасы микробной биомассы в 50сантиметровом слое почвы. Наибольшее количество биомассы микроорганизмы формируют в почве лесополосы и залежи. В почве севооборота и бессменного пара биогенность гумуса снижается на 23 и 52% соответственно. Повышение активности почвенной микрофлоры приводит к усилению разложения органического вещества почвы и к снижению ее плодородия. Наибольшего развития бактерии, усваивающие минеральный азот, достигают при внесении навоза и полного минерального удобрения.

При локальном внесении мочевины численность аммонификаторов в очаге увеличивается в 1,2-1,5 раза, одновременно снижается численность иммобилизаторов азота, олигонитрофилов, грибов и актиномицетов. Сукцессионные изменения основных трофических групп микроорганизмов свидетельствуют о временных негативных тенденциях при локальном внесении удобрений, поскольку снижается связывание азота в микробной биомассе.

По численности олигозафилов системы обработки почвы располагались с убывающей последовательностью: плоскорезная, комбинированная, отвальная со вспашкой под сахарную свеклу по схеме улучшенной зяби и полупара. При безотвальной обработке почвы возрастает численность целлюлозоразлагающих микроорганизмов. Плоскорезная и комбинированная обработки способствуют развитию грибов.

Результатом водной эрозии черноземных почв является снижение содержания общего азота и других его форм. Наиболее обеспеченным азотом

оказываются почвы северного склона. В почве пахотного слоя склона южной экспозиции содержится меньше легкогидролизуемого азота и больше азота негидролизуемой фракции по сравнению с почвой северного склона. В почве южного склона складываются более благоприятные условия для использования богатого азотом органического вещества почвы. При распашке целины преобладающей формой минерального азота становятся нитраты: их количество на водоразделе возрастает в 3 раза, на северном склоне – в 4,6 раза, на южном склоне – в 10,2 раза по сравнению с целинной почвой.

Процесс иммобилизации у чернозема типичного разной степени смывости характеризуется преимущественным накоплением азота удобрения (^{15}N) во фракциях гуминовых кислот (29-32%) и гуминов (40-41%) по сравнению с фракциями фульвокислот (18-19%).

Со смывом почвы в Центральном Черноземье теряется 7-18 кг N/га в год. На полях, занятых озимыми культурами, потери азота со смывом почвы сокращаются в 2-3 раза, а на полях с многолетними травами – в 10 раз. После двух лет последствия содержание остаточного азота удобрения (^{15}N) в среднеэродированном черноземе снижается на 34-47% от закрепленного.

В условиях чернозема типичного (Курская обл.) вико-овес и кукуруза на южном склоне потребляют больше, а зерновые культуры – меньшее количество азота на формирование единицы продукции по сравнению с северным склоном. В условиях выщелоченного чернозема (Белгородская обл.) кукуруза и озимая пшеница на северном склоне лучше использовали азот удобрения и азот почвы, что обеспечивает формирование более высокого урожая по сравнению с водоразделом. С увеличением глубины внесения азотных удобрений использование азота удобрения ячменем снижается с 43,5 до 14,6% на неэродированной почве и с 21,7 до 6,9% на эродированной почве.

Сложность управления эмиссией азотсодержащих соединений состоит в том, что газообразные продукты азота образуются в целом ряде процессов, протекающих в почве одновременно параллельно или в противоположном направлении. В первые две недели после внесения азотных удобрений за 1 сутки из чернозема теряется 7,6 г/га окислов азота. За период наиболее интенсивного выделения газообразных продуктов потери азота в виде окислов из чернозема достигают 200 г/га. Потери азота удобрения на черноземных почвах в зависимости от вида выращиваемой культуры достигают 10-58% от применяемой дозы, в среднем 27% (20-34%). Потери азота биомассы горчицы белой (меченой ^{15}N) снижаются более чем в 2 раза по сравнению с потерями азота мочевины.

Для почв целинной степи характерна сезонная динамика потоков N_2O в интервале от минус 0,05 (третья декада июня) до 0,24 мг $\text{N}_2\text{O}/\text{м}^2 \cdot \text{день}$ (вторая декада сентября). Максимальный пик эмиссии N_2O приходится на вторую декаду октября (0,69 мг $\text{N}_2\text{O}/\text{м}^2 \cdot \text{день}$). Динамика потоков N_2O в агроэкосистемах пастбища и черного пара характеризуется четко выраженной эмиссией, максимальное значение которой составляет 0,85 и 0,74 мг $\text{N}_2\text{O}/\text{м}^2 \cdot \text{день}$ соответственно.

Исследования, выполненные с применением ^{15}N , свидетельствуют о негативных изменениях в режимах функционирования агроэкосистем на

черноземных почвах при увеличении антропогенной нагрузки. Показатели рециркуляции азота во внутрпочвенном цикле (РИ:М) и соотношение между нетто-минерализацией и реиммобилизацией (Н-М:РИ) интегрально отражают изменения устойчивости агроэкоecosистем при применении органических и минеральных удобрений. При внесении минеральных удобрений агроэкоecosистема функционирует в режиме стресса при допустимом уровне воздействия, тогда как органические удобрения (осветленные свиноводческие стоки, биомасса горчицы белой) обеспечивают более устойчивое функционирование системы в зоне гомеостаза.

Реакция среды играет регулирующую роль в образовании и эмиссии газообразных соединений азота. Высокий уровень содержания нитратов в почве и снижение рН с 7 до 5 увеличивает долю N_2O в составе газообразных продуктов. Экологическое значение гетеротрофной нитрификации состоит в том, что в отличие от автотрофной нитрификации, она активно протекает в кислых условиях среды. Декальцинирование почв Центрального Черноземья является «пусковым механизмом» деградации черноземов. Ежегодные потери урожая зерновых культур за счет кислотности черноземов составляют 10-12 млн. т зерна.

В черноземе выщелоченном (Пензенская обл.) снижение величины рН ниже исходного вызывало повышение содержания аммонийного азота в 1,8 раза, тогда как содержание нитратов снижается в 2,4-5,5 раз. При подкислении среды содержание минерального азота в пахотном слое выщелоченного чернозема снижалось в 1,4-1,5 раза. При изменении рН активность протеазы снижается в 1,2-2,5 раза, уреазы – в 1,1-2,2 раза. При известковании количество минерального азота в почве повышается: нитратов на 30%, аммонийного азота – на 23%. При снижении рН до 5,0 уменьшается потребление азота удобрения в 1,1-1,2 раза, азота почвы – в 1,4-1,6 раза и азота стоков свиноводческого комплекса – в 1,1-1,2 раза. При снижении рН до 5,0 снижается иммобилизация азота удобрения и повышаются газообразные потери его в 1,2-1,8 раза. При кислой реакции среды, образующиеся NO_2^- , разлагаются с образованием газообразных соединений (NO и N_2O).

При внесении мочевины (60 кг N/га) агрофитоценоз озимой пшеницы (чернозем типичный, рН 6,5) находился в состоянии резистентности, а при рН 5,0 – в состоянии адаптационного истощения. Внесение стоков свиноводческого комплекса (100 кг N/га) повышает устойчивость агрофитоценоза при рН 6,5 до состояния экологического равновесия (гомеостаза), тогда как при рН 5,0 до состояния близкому к стрессу.

Поступление азота с атмосферными осадками является одним из источников поддержания нитратного бюджета наземных экосистем. В зоне черноземных почв за счет атмосферных осадков поступает 2-6 кг N/га в год, при локальном загрязнении количество поступающего азота с осадками возрастает в 3-4 раза. Размеры нисходящего потока NO_3^- с инфильтрационными водами на черноземных почвах достигают 24-29 кг/га в год. Локальное загрязнение подземных вод органическим азотом происходит в местах расположения навозохранилищ, отстойников навозной жижи, силосохранилищ, откормочных площадок. С поверхностным стоком в зоне черноземных почв теряется 1-9,7 кг N/га в течение года.

При выращивании риса в условиях затопления в лиманы поступает до 30% азота удобрения от применяемой дозы, со сбросными водами теряется 8-18 кг N/га ежегодно. При локальном внесении мочевины (вместе с семенами) потери азота сокращаются в 2,5 раза по сравнению с традиционным способом применения удобрений.

Увеличение количества нитратов в грунтовых и поверхностных природных водах происходит в весенние месяцы. Содержание азота в воде рек, расположенных ниже хранилища жидкого навоза, может повышаться в 1,4 раза.

Получение высококачественной экологически безопасной продукции растениеводства является приоритетной задачей земледелия на черноземных почвах. Важнейшим условием получения продукции высокого качества по комплексу показателей является система удобрений в севообороте. Озимая пшеница формирует зерно высокого качества по чистому и сидеральному пару при применении полного минерального удобрения (азот в дозе 90-120 кг N/га). Под действием возрастающих доз азотных удобрений повышается содержание сырого белка, клейковины, масса 1000 зерен, стекловидность и сила муки; снижается содержание жира и клетчатки.

Размеры накопления NO_3^- в растениях сопряжены с внутрипочвенным циклом азота, общим метаболизмом растительного организма и факторами окружающей среды. Негативные последствия применения высоких и несбалансированных доз азотных удобрений проявляются, с одной стороны, в избыточном поступлении азотных соединений в грунтовые воды и поверхностные водоемы, а с другой – в увеличении накопления нитратов в овощных, технических и кормовых культурах, усилении поражаемости растений болезнями и вредителями, неравномерном созревании урожая и снижении его устойчивости при транспортировке и хранении.

При выращивании сельскохозяйственных культур в различных регионах страны при интенсивном применении азотных удобрений содержание NO_3^- в продукции возрастает в 4-24 раза. Это увеличение происходит в основном за счет азота почвы, поскольку за счет азота удобрений накапливается 18-38% нитратов от их общего количества в растениях. Под действием азотных удобрений содержание NO_3^- в урожае сельскохозяйственных культур колеблется в широких пределах: от 1,4 раза в плодах томатов до 16 раз в листьях салата.

При различных погодных условиях под действием азотных удобрений содержание NO_3^- в ботве сахарной свеклы изменялось в 3-9 раз. Содержание нитратов в ботве свеклы снижалось в 8,7 раз при увеличении влагообеспеченности на фоне без удобрений и в 3-9 раз при внесении удобрений.

Таким образом, для черноземных почв России характерны большие запасы углерода и азота, активное развитие почвенно-биологического комплекса. При длительном использовании черноземы теряют значительное количество гумуса и азота, что приводит к снижению их плодородия. Оптимизация содержания гумуса и азота в черноземах достигается системой севооборотов, системой обработки почвы и системой применения органических и минеральных удобрений.

На основании вышеизложенного и проведенного анализа считаем целесообразным проведение исследований по следующим направлениям:

- потоки и баланс азота в агроecosистеме при длительном применении минеральных и органических удобрений, меченных ^{15}N ;
- участие азота минеральных и органических удобрений, меченных ^{15}N , в формировании органического вещества различных подтипов черноземов;
- исследование эмиссии парниковых газов из черноземных почв при длительном использовании удобрений и различных видов обработки;
- участие азота удобрений в продукционном процессе (величина и качество урожая) сельскохозяйственных культур в условиях севооборота;
- разработка системы управления процессами азотфиксации микробных и растительных компонентов агроecosистем в условиях черноземных почв;
- выявление путей снижения загрязнения водных экосистем при длительном применении отходов животноводческих комплексов.

Литература

1. *Авраменко П.С., Гетманец А.Я., Турчин В.В.* Общий и хозяйственный вынос элементов питания озимой пшеницей в степи УССР // *Агрохимия*. 1978. № 5. С. 50-56.
2. *Агафонов Е.В., Каменский Н.П., Гужвин С.Д.* Влияние удобрений и бактериальных препаратов на урожайность и качество клубней картофеля на черноземе обыкновенном // *Плодородие*. 2013. № 3. С. 17-19.
3. *Агафонов Е.В., Олейников В.Н.* Урожайность и качество зерна новых сортов яровой пшеницы в Ростовской области // *Плодородие*. 2008. № 5. С. 40-41.
4. *Агропромышленный комплекс России в 2016 году*. М.: Минсельхоз России, 2016. 704 с.
5. *Адерихин П.Г.* Изменение черноземных почв ЦЧО при использовании их в сельском хозяйстве / В кн.: *Черноземы ЦЧО и их плодородие*. М.: Наука, 1964. 236 с.
6. *Адерихин П.Г., Щербаков А.П.* Азот в почвах Центрально-Черноземной полосы. Воронеж: ВГУ, 1974. С. 75-82.
7. *Азаров В.Б., Завалин А.А., Акулов П.Б., Соловиченко В.Д., Азаров Б.Ф.* Влияние типов севооборотов, способов основной обработки и уровней удобрённости на содержание минерального азота в черноземе типичном // *Агрохимия*. 2003. № 3. С. 5-17.
8. *Азизов Э.М.* Влияние систем удобрения и обработки почвы на плодородие чернозема южного и продуктивность сельскохозяйственных культур // *Агрохимия*. 2005. № 5. С. 34-43.
9. *Акулов П.Г.* Воспроизводство плодородия и продуктивность черноземов. М.: Колос, 1992. 223 с.
10. *Алмазов Б.Н., Гусев М.И., Холуяко Л.Т.* Динамика питательных веществ в почве, вынос их урожаем и продуктивность овощного севооборота при длительном систематическом применении удобрений в условиях Алтайского края // *Агрохимия*. 1976. № 4. С. 51-55.
11. *Алмазов Б.Н., Холуяко Л.Т.* Изменение продуктивности овощного севооборота и плодородия чернозема выщелоченного в зависимости от применения органических и минеральных удобрений. Сообщ. 3. Влияние торфа и минеральных удобрений на вынос азота, фосфора и калия различными сортами овощных культур и картофеля в севообороте // *Агрохимия*. 1990. № 4. С. 68-74.
12. *Алмазов Б.Н., Холуяко Л.Т.* Влияние удобрений на продуктивность культур севооборота на слабовыщелоченном черноземе Западной Сибири // *Агрохимия*. 1983. №5. С. 44-50.

13. *Амелин А.А.* Особенности аккумуляции нитратов растениями в зависимости от условий питания и климатических факторов. Автореф. канд. дисс., М., МГУ. 1996. 21 с.

14. *Амиров М.Б.* Теоретические и технологические основы воспроизводства плодородия почв в современных системах земледелия Предуралья Башкортостана. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 1992. 51 с.

15. *Андранова Н.Г., Барсуков П.А.* Содержание нитратов в кормовых культурах при орошении // *Агрохимия*, 1998, №1. С. p28-38.

16. *Аникст Д.М., Симицын Ю.Л.* Минеральные удобрения и содержание сахара в сахарной свекле // *Агрохимия*. 1972. № 5. С. 88-93.

17. *Антонив С.Ф.* Потребление питательных веществ сахарной свеклой и ее продуктивность в зависимости от применения удобрений в севообороте // *Агрохимия*. 1981. №8. С. 39-46.

18. *Бабьева И.П., Зенова Г.М.* Биология почв. М.: МГУ, 1989. 335 с.

19. *Баршадская С.И., Квашин А.А., Дерена Ф.И.* Плодородие чернозема обыкновенного и продуктивность основных, сельскохозяйственных культур // *Плодородие*. 2011. № 2. С. 36-38.

20. *Безлер Н.В., Петюренко М.Ю., Хуссейн А.С.* Внесение в почву азотфиксирующей бактерии *Pseudomonas fluorescens* 116 и динамика доступных форм азота в посевах сахарной свеклы // *Плодородие*. 2016. № 6. С. 9-11.

21. *Безлер Н.В., Хуссейн А.С., Петюренко М.Ю.* ПЦР идентификация и генетическое разнообразие *Pseudomonas fluorescens*, выделенных их агроценоза сахарной свеклы // *Вестник ВГУ*. 2016. № 1. С. 43-49.

22. *Белевцев Д.Н.* Влияние основного внесения различных видов доз и сочетаний удобрений на качество семян подсолнечника // *Бюллетень НТИ ДЗНИИСХ*. 1971. С. 27-29.

23. *Беляева О.Н.* Система NO-Till и ее влияние на доступность азота почв и удобрений: обобщение опыта // *Земледелие*. 2013. № 7. С. 16-18.

24. *Бесланев С.М., Багом М.Б., Булатова О.М.* Влияние удобрений на качество сельскохозяйственной продукции // *Агрохимический вестник*. 2007. № 6. С. 8.

25. *Бесланев С.М., Шалов Т.Б., Багом М.Б., Лакунов А.Ж.* Урожайность озимой пшеницы и микробоценоз чернозема при внесении удобрений // *Плодородие*. 2005. № 4. С. 3-4.

26. *Беспалов В.А., Гринберг И.И.* Агрохимические свойства почв и эффективность применения минеральных удобрений в восточных районах края // *Сб.: Удобрения – резерв плодородия*. Красноярск: Кн. изд., 1982. С. 78-107.

27. *Благодатская Е.В.* Изменение экологической стратегии микробного сообщества, инициированное внесением глюкозы // *Почвоведение*. 2001. № 5. С. 600-608.

28. *Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д., Мякишина Т.Н.* Характеристика состояния микробного сообщества почв по величине метаболического коэффициента // *Почвоведение*. 1995. № 2. С. 205-210.

29. *Благодатский Р.А., Паников Н.С.* Количественная оценка размеров биологической иммобилизации азота в почвенных микроорганизмах // *Биол. науки*. 1989. № 8. С. 96-103.

30. *Благодатский С.А., Благодатская Е.В., Розанова Л.Н.* Кинетика и стратегия роста микроорганизмов в черноземной почве после длительного применения различных систем удобрения // Микробиология. 1994. Т. 63. Вып. 2. С. 298-307.
31. *Благодатский С.А., Ларионова А.А., Евдокимов И.В.* Действие минеральных соединений азота на интенсивность дыхания и эффективность роста микроорганизмов в почве // Почвоведение. 1992. № 9. С. 88-96.
32. *Благодатский С.А., Паников Е.С., Самойлов Т.И.* Влияние агротехнических приемов на динамику запасов микробного азота в серой лесной почве // Почвоведение. 1989. № 2. С. 52-60.
33. *Богданов Ф.М.* Влияние удобрений на плодородие чернозема типичного и продуктивность зернопропашного севооборота в предуральской степи Башкортостана. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1993. 25 с.
34. *Богомазов Н.П.* Эколого-агрохимическая эффективность удобрений на выщелоченных черноземах. Автореф. дисс. ... д-ра с.-х. наук. ВИУА. 1994. 45 с.
35. *Бодров В.П., Вислабокова Л.Н.* Эффективность известкования средневщелоченного чернозема // Химизация сельского хозяйства. 1988. № 3. С. 66-68.
36. *Бондаренко В.М.* Изучение превращений в почве и эффективности азота удобрений при повышении их доз под сахарную свеклу. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1989. 22 с.
37. *Борисова Н.И., Бурцева С.В., Радионов В.И., Семенов Ю.И.* Влияние влажности почвы на газообразные потери азота в результате денитрификации // Бюллетень Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 1978. Вып. 19. С. 73-78.
38. *Бородин Н.Н.* Возделывание проса на Дону. Ростов: Кн. Изд., 1961. 37 с.
39. *Боронин А.М.* Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas*, способствующие росту и развитию растений // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 10. С. 25-31.
40. *Бочкарев А.Н.* Пути повышения коэффициента использования азота удобрений рисом. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук М.: ВИУА, 1984. 16 с.
41. *Бровкин В.И.* Влияние удобрений на продуктивность культур и свойства почв четвертой ротации зернового севооборота на черноземе выщелоченном Тульской области // Агрохимия. 2000. № 6. С. 36-41.
42. *Бровкин В.И.* Влияние удобрений на продуктивность культур пятой ротации зернового севооборота на выщелоченном черноземе Тульской области // Агрохимия. 2008. № 4. С. 52-58.
43. *Бровкин В.И., Синягина Н.И.* Влияние систематического внесения минеральных удобрений на свойства выщелоченного чернозема северной лесостепи и продуктивность культур. Сообщ. 1. Продуктивность культур и вынос основных элементов питания // Агрохимия. 1982. № 2. С. 27-34.
44. *Бугаков П.С., Дугаров В.И., Корсунов В.М.* Чернозем Восточной Сибири. Кн.: Плодородие черноземов России. М.: Агроконсалт. 1998. С. 627-631.

45. *Будажанов Л.В.* Биокинетический цикл азота почва-удобрение-растение в условиях Забайкалья. Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. М.: ВНИИА, 2009. 43 с.

46. *Бусержа Н.* Продуктивность сахарной свеклы в зависимости от интенсификации технологии ее выращивания на выщелоченном черноземе Западного Предкавказья. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Краснодар: КГАУ. 1996. 25 с.

47. *Бутняков С.И.* Изменение нитратов и фосфорной кислоты в почве под культурными растениями // Журнал опытной агрономии Юго-Востока. 1927. Т. 5. С. 8-12.

48. *Бучкина Н.П., Балашов Е.В., Рижия Е.Я., Павлик С.В.* Мониторинг эмиссии закиси азота из сельскохозяйственных почв. Методические рекомендации. СПб.: Россельхозакадемия, 2008. 20 с.

49. *Ванин Д.Е., Ванин Ю.Д., Мясенкин А.А., Бутко И.В.* Оценка систем удобрения в зерносвекловичном севообороте на типичном черноземе Курской области // Агрохимия. 2008. № 9. С. 37-44.

50. *Варюшкина Н.М., Никифорова М.В., Никитина М.М.* Превращение азота органических и минеральных удобрений в системе почва-растение. Бюлл. ВИУА. 1979. № 45. С. 18-25.

51. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 181 с.

52. *Вернадский В.И.* Труды по истории науки в России. М.: Наука. 1988. С. 344-345.

53. *Верниченко Л.Ю., Мишустин Е.Н.* Использование соломы как компенсирующего удобрения. – М.: Наука, 1980. – 116 с.

54. *Верниченко Л.Ю., Мишустин Е.Н.* Использование соломы как компенсирующего удобрения. – М.: Наука, 1980. – 116 с.

55. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р., Кашеваров Н.И.* Эффективность минеральных удобрений и растительных остатков при длительном использовании // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2010. Вып.1. С. 29-31

56. *Никитишен В.Н.* Опыт изучения глубинной миграции азота в почве / В кн.: Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Л., 1980. 73 с.

57. *Панников В.Д., Верниченко Л.Ю.* Теория и практика повышения плодородия почв // Вестник сельскохозяйственных наук. 1984. №3. С. 43-45.

58. *Чуян Н.А., Еремина Р.Ф., Черкасов Г.Н.* Изменение запасов нитратного азота в различных слоях чернозема типичного при внесении соломы и растительных остатков с минеральными удобрениями // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2011. № 2. С. 35-37.

59. *Шарков И. Н.* Минимизация обработки и ее влияние на плодородие почвы // Земледелие. 2009. №3. С. 24-27.

60. *Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Коротких Н.А.* Разработка технологии NO-Till на черноземе выщелоченном лесостепи Западной Сибири // Земледелие. 2011. № 5. С. 20-22.

61. *Власенко А.Н., Шарков И.Н., Синещев Е.Е., Прозоров А.С.* Минимизация обработки почвы и минерализация соединений азота // Почвоведение. 2001. № 9. С. 1111-1117.

62. *Власенко Н.Г., Садокина Т.П.* Приемы агротехники, способствующие оптимизации фитосанитарного состояния посевов ячменя // *Земледелие*. 2010. № 6. С. 30-31.
63. *Власова Т.А.* Азот в черноземах Среднего Поволжья. М.: Агроконсалт, 1999. 64 с.
64. *Водянов В.А., Рубин М.Д.* Удобрения и урожай зеленой массы кукурузы при бессменном возделывании на южных черноземах Нижнего Поволжья // *Агрохимия*. 1982. № 9. С. 66-70.
65. *Возняковская Ю.М., Курдюков Ю.Ф., Попова Ж.П.* Оценка биологического состояния южного чернозема под разными севооборотами // *Почвоведение*. 1996. № 9. С. 1107-1111.
66. *Войтенко С.И., Иванова В.И.* Вынос азота, фосфора и калия культурами севооборота в зависимости от уровня применения навоза и минеральных удобрений // *Агрохимия*. 1974. № 7. С. 43-49.
67. *Волошин С.П.* Агроэкологическая эффективность различных доз и сочетаний органических и минеральных удобрений при возделывании яровой пшеницы в севообороте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2017. 22 с.
68. *Волынкин В.И., Волынкина О.В.* Влияние удобрений на урожай и качество зерна яровой пшеницы при разных погодных условиях // *Агрохимия*. 1999. №5. С. 48-54.
69. *Воронин В.М.* Плодородие выщелоченного чернозема, урожай и качество корнеплодов сахарной свеклы в связи с применением жидких азотных удобрений. Автореф. дисс. ... д-ра с.-х. наук С.-Петербург: Спб. ГАУ, 1997. 40 с.
70. *Выблов Н.В.* Влияние удобрений на микрофлору серых лесных почв Горного Алтая. Сб.: Микробные ассоциации и их функционирование в почвах Западной Сибири. Новосибирск. 1979. С. 178-183.
71. *Галицкий В.В.* Влияние азотных удобрений на продуктивность озимой пшеницы на черноземах юга Центрального Черноземья. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2012. 25 с.
72. *Гамзиков Г.П.* Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: НГАУ, 2013. 790 с.
73. *Гамзиков Г.П.* Азот в земледелии Западной Сибири. М.: Наука, 1981. 267 с.
74. *Гамзиков Г.П., Барсуков П.А.* Влияние предшествующей удобренности почвы на баланс азота вновь внесенных удобрений // *Агрохимия*. 2001. № 17. С. 13-22.
75. *Гамзиков Г.П., Кострик Г.И., Емельянова Е.Н.* Баланс и превращение азота удобрений. Новосибирск: Наука, 1985. 160 с.
76. *Гамзикова О.И.* Генетика агрохимических признаков пшеницы. Новосибирск, 1994. 220 с.
77. *Гармашов В.М.* Влияние основной обработки на агрофизические показатели чернозема обыкновенного // *Земледелие*. 2004. № 6. С. 12-14.
78. *Гармашов В.М., Качанин А.П.* Минимизация обработки почвы в Центрально-Черноземной зоне // *Земледелие*. 2007. № 6. С. 8-10.

79. *Геращенко И.Г., Кузьмин М.С.* Влияние азотных удобрений на урожайность пшеницы при различной технологии основной обработки почвы // Научн.-техн. бюлл. Интенсификация производства зерна в Амурской области. Новосибирск. 1990. Вып.1. С. 38-44.

80. *Геркиял А.М.* Накопление органических веществ и элементов питания в почве с пожнивными корневыми остатками парозанимающих культур // Агрохимия. 1974. № 2. С. 15-19.

81. *Гетманец А.Я.* Баланс азота в системе удобрение-растение на черноземах степи Украины // Кн.: Применение ^{15}N в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 13-15.

82. *Гетманец А.Я., Авраменко П.С.* О вертикальной миграции нитратного азота в черноземе обыкновенном степной зоны Украины // Почвоведение. 1976. № 9. С. 46-50.

83. *Голобородько С.П., Иутинская Г.А.* Влияние орошения и интенсивного удобрения культурного пастбища на его продуктивность и численность микроорганизмов в условиях юга Украинской ССР // Докл. ТСХА. 1978. Вып. 239. С. 121-124.

84. *Головина Н.О.* Агроэкологическая оценка азотминерализующей способности почв Московской области. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: МСХА, 2000. 17 с.

85. *Голубцов А.М.* Удобрение озимой пшеницы на карбонатном черноземе Кубани при орошении // Агрохимия. 1973. № 1. С. 61-63.

86. *Грислис С.В.* Сельскохозяйственное использование навозных стоков и сточных вод заводов минеральных удобрений. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук М.: ВИУА, 1993. 41 с.

87. *Громовик А.И., Королев В.А.* Изменение основных показателей плодородия черноземов выщелоченных при длительном применении удобрений. Доклады РАСХН. 2015. №6. С. 24-28.

88. *Гулидова В.А.* Теоретические основы повышения урожайности культур и снижение энергозатрат в севообороте с рапсом при разных системах основной обработки почвы в лесостепи ЦЧР. Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. Воронеж: ВГУ, 2000. 46 с.

89. *Гусаров В.Г.* Потери питательных веществ в зависимости от интенсивности эрозии // Бюллетень ВИУА. 1987. № 81. С.45-51.

90. *Девятова Т.А.* Скорость и интенсивность выделения закиси азота черноземом обыкновенным в различных ценозах // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Серия Химия, Биология, Формация. 2010. Т. 32. С. 76-80.

91. *Дедов А.А., Дедов А.В., Несмеянова М.А.* Динамика разложения растительных остатков в черноземе типичном и продуктивность культур севооборота // Агрохимия. 2016. № 6. С. 3-8.

92. *Дедов А.В., Придворев Н.И., Верзилин В.В.* Трансформация послеуборочных остатков и содержание водорастворимого гумуса в черноземе выщелоченном // Агрохимия. 2004. № 2. С. 13-22.

93. *Дедов А.В., Придворев Н.И., Морозова Е.В.* Трансформация послеуборочных остатков и содержание в почве подвижных гумусовых веществ // Агрохимия. 2001. №11. С. 26-33.

94. *Дерябина А.П., Надточий М.М., Тилицкий В.В.* Оренбургское просо. Челябинск: Южно-Урал. Кн. изд., 1975. 51 с.
95. *Джанаев Г.Г., Фарниев А.Т., Джанаев З.Г.* Влияние системы удобрения на интенсивность микробиологических процессов, агрохимические свойства чернозема выщелоченного и продуктивность севооборота // *Агрохимия*. 2006. № 12. С. 3-10.
96. *Дмитренко П.А.* Использование озимой пшеницей и сахарной свеклой азота удобрений при разных условиях их применения // *Агрохимия*. 1977. № 10. С. 9-18.
97. *Дмитриев Е.А.* Экологические аспекты почвенных режимов // *Почвоведение*. 1997. № 7. С. 20-22.
98. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов М.Ю. и др.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // *Почвоведение*. 2015. № 9. С. 1087-1096.
99. *Добровольский Г.В., Умаров М.М.* Почва, микробы и азот в биосфере // *Природа*. 2003. № 6. С. 15-22.
100. *Докучаев В.В.* Избранные сочинения. М.: 1948. Т.1. 480 с.
101. *Докучаев В.В.* Наши степи прежде и теперь. М.-Л.: Огизсельхозиздат, 1936. 148с.
102. *Докучаев В.В.* Русский чернозем. Избранные сочинения. М.: Сельхозгиз, 1948. Т. 1. 523с.
103. *Докучаев В.В.* Русский чернозем. М.-Л., 1936. 551с.
104. *Докучаев В.В.* Сочинения. М.-Л.: АН СССР, 1949. Т. VII. С. 422-423.
105. *Доманов Н.М.* Разработка и оптимизация комплексного применения средств химизации под озимую пшеницу в Центрально-Черноземной зоне России. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. М.: ВИУА. 1995. 57 с.
106. *Евдокимов И.В., Благодатский С.А., Ларионова А.А. и др.* Скорость оборачиваемости микробной биомассы в почве в зависимости от доз азотного удобрения // *Агрохимия*. 1991. № 12. С. 49-56.
107. *Емельянова В.И.* Пути повышения использования растениями и снижение потерь азота удобрений. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Новосибирск: ИПА, 1985. 22 с.
108. *Емцев В.Т., Ницше Л.К.* Влияние соломы на микробиологические процессы в почве при ее использовании в качестве органического удобрения. М.: Наука, 1980. С. 70-102.
109. *Ермолов А.С.* Избранные труды. М.: Колос, 1995. 381 с.
110. *Еськов В.А., Кузьмина А.П., Стулин А.Ф., Савина М.С.* Влияние ежегодного внесения удобрений на продуктивность севооборота и баланс питательных веществ // *Агрохимия*. 1984. № 8. С. 23-30.
111. *Журбицкий З.И.* Особенности минерального питания овощных культур. М.: Наука, 1963. 181 с.
112. *Заболоцкая Т.Г., Лютаева М.Н.* Послеуборочные остатки полевых культур, их разложение и влияние на содержание подвижных форм в некоторых подзолистых почвах // *Агрохимия*. 1974. № 2. С. 3-7.
113. *Завалин А.А.* Оптимизация минерального питания и продуктивности растений при использовании биопрепаратов и удобрений // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. № 5. С. 26-28.

114. Завалин А.А., Благовещенская Г.Г., Кожемяков А.П. Вклад биологического азота бобовых культур в азотный баланс земледелия России. М.: Россельхозакадемия, 2007. 44 с.

115. Завалин А.А., Пасынков А.В., Понамарева М.И., Козлова Л.М., Пасынкова Е.Н. Роль бобовых культур в земледелии Кировской области // Агрохимия. 2002. № 6. С. 66-71.

116. Завалин А.А., Соколов О.А. Потоки азота в агроэcosysteme: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.

117. Закладная А.Г., Волкова Л.Д., Тарасова Н.С. Кормовые культуры при орошении лесостепной зоне Новосибирской области. Сб.: Интенсификация кормопроизводства Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: СО ВАСХНИЛ, 1980. С. 38-45.

118. Захаров А.А., Пшеничный А.Е. Влияние минеральных удобрений на урожай и технологические качества яровой пшеницы в зависимости от предшественников // Агрохимия. 1975. № 7. С.52-57.

119. Захаров Б.А., Леплявченко Л.П. Изменение плодородия почв во времени. Кн.: Технология возделывания зерновых культур в Краснодарском крае. Краснодар. 1980. С. 43-50.

120. Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. М.: МГУ, 1987. 256 с.

121. Звягинцев Д.Г., Добровольская Т.Г., Бабьева И.П. и др. Роль микроорганизмов в биоценологических функциях почв // Почвоведение. 1992. № 6. С. 63-77.

122. Звягинцев Д.Г., Добровольская Т.Г., Бабьева И.П. и др. Роль микроорганизмов в биоценологических функциях почв / Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере. М.: Наука, 2003. С. 115-124.

123. Зеленский Н.А. Проблема сохранения и повышение плодородия почв юга России // Земледелие. 2007. № 5. С. 8-9.

124. Зубенко В.Ф. Применение стабильного изотопа ^{15}N в изучении азотного питания сахарной свеклы // Агрохимия. 1977. № 1. С. 3-11.

125. Иванов А.Л. Почвенный покров России в условиях глобальных вызовов // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 11. С. 984-992.

126. Иванова Е.А., Кутюжная О.В., Тхакахова А.К. и др. Структура микробного сообщества агрегатов чернозема типичного в условиях контрастных вариантов сельскохозяйственного использования // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1367-1382.

127. Иванова О.М. Оптимизация азотного питания различных сортов озимой пшеницы в ЦЧЗ. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2013. 25 с.

128. Ивойлов А.Б. Основная обработка выщелоченных черноземов // Земледелие. 1991. № 11. С. 53-55.

129. Игнатъев Б.К. Удобрение подсолнечника. Кн.: Агрохимия и удобрение полевых культур. Краснодар: Книжн. Изд., 1968. С. 15-169.

130. Ильюшенко И.В. Закономерности взаимодействия агрохимических свойств черноземных почв и доз минеральных удобрений при формировании продуктивности сахарной свеклы. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук М.: ВНИИА. 2015. 25 с.

131. *Каличкин В.К., Малыгин А.Е.* Сезонная динамика запасов углерода и азота в микробной биомассе чернозема выщелоченного // *Агрохимия*. 2005. № 11. С. 15-23.
132. *Кануков З.Т., Лазарев Т.К., Дзакатов З.К.* Плодородие чернозема и урожайность озимой пшеницы при применении удобрений // *Плодородие*. 2008. №6. С. 6-9.
133. *Караулова Л.Н.* Динамика подвижных соединений азота в черноземах типичных пахотных склонов ЦЧЗ. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Курск: КГСХА, 2005. 22 с.
134. *Каутская Л.Б.* Некоторые микробиологические показатели чернозема мощного слабовыщелоченного при длительном применении удобрений. Сб.: Микроорганизмы как компонент биогеоценоза. Алма-Ата. 1982. С. 115-116.
135. *Каштанов А.Н., Явтушенко В.Е.* Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 240 с.
136. *Квасников Б.В.* Овощные культуры. М.: Сельхозиздат. 1960. 534 с.
137. *Кизяков В.Е.* Накопление питательных веществ за счет пожнивных и корневых остатков зерновых культур в обыкновенном черноземе // *Агрохимия*. 1981. № 2. С. 49-53.
138. *Кильчевский А.Л., Суворов К.И.* Влияние минеральных удобрений на урожай и качество сахарной свеклы в Белгородской области // *Агрохимия*. 1976. № 3. С. 79-83.
139. *Кирюхина З.П., Пацкевич З.В.* Эрозированность пахотных почв России в период ливневого стока // *Почвоведение*. 2001. № 9. С. 1140-1146.
140. *Клевенская И.Л.* Активность азотфиксации в почве и ризосфере дикорастущих трав Горного Алтая. Сб.: Микробиологические процессы в почвах Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1982. С. 82-88.
141. *Клевенская И.Л.* Экологические и агрономические аспекты несимбиотической азотфиксации азота. Сб.: Биологическая фиксация азота. Новосибирск: Наука, 1991. С. 186-241.
142. *Кленов Б.М., Зайцева Т.Ф.* Орошение черноземов как антропогенный фактор деградации их гумуса. // Тез. докл. II съезда почвоведов России, Спб., 1996. С. 175-176.
143. *Коданев И.М.* Повышение качества зерна. М.: Колос. 1976. 304 с.
144. *Козлова А.В.* Эффективность длительного применения органических минеральных удобрений в различных дозах и сочетаниях при возделывании овса в полевом севообороте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2015. 26 с.
145. *Колсанов Г.В.* Солома как удобрение в зернопропашном севообороте на черноземе лесостепи Поволжья // *Агрохимия*. 2006. № 5. С. 30-40.
146. *Коновалов Н.Д.* Пути повышения плодородия почвы и урожайности сельскохозяйственных культур в Центрально Черноземной зоне. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1996. 40 с.
147. *Копцева Р.Д.* Урожай и качество зерна озимой ржи в зависимости от сроков внесения удобрений // *Химия в сельском хозяйстве*. 1974. №5, С. 6-7.
148. *Кореньков Д.А.* Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Агроконсалт, 1999. 296 с.

149. Кореньков Д.А., Лаврова И.А. Превращение азотных удобрений в почве при внесении их разные культуры // Агрохимия. 1973. № 3. С. 3-9.
150. Коробской Н.Ф. Агроэкологические проблемы повышения плодородия черноземов Западного Предкавказья. Пушино: ОНТИ, 1995. 211 с.
151. Королева И.Е. Трансформация остаточного азота удобрений в зависимости от минералогического состава тонкодисперсной фракции почвы / Сб.: Почвенно-агрохимические и экологические проблемы формирования высокопродуктивных агроценозов. Пушино: ОНТИ, 1988. С. 95-96.
152. Костров К.А., Хопов И.П. О сроках и способах внесения минеральных удобрений под озимую рожь на выщелоченных черноземах Мордовской АССР. // Химия в сельском хозяйстве. 1971, №1. С.11-12.
153. Котлярова Е.Г. Динамика органического вещества почвы в системе ландшафтного земледелия // Земледелие. 2015. № 3. С. 20-24.
154. Котлярова Е.Г., Ягуткин С.М. Сохранение почвенного плодородия – задача комплексная // Земледелие. 2008. №7. С. 12-14.
155. Кочергин А.Е. Особенности азотного питания сельскохозяйственных культур и применение удобрений на черноземах в Омской области. Сб.: Система удобрений полевых культур в Сибири. Новосибирск, 1984. С. 3-16.
156. Кочергин А.Е., Гамзиков Г.П. Эффективность азотных удобрений в черноземной зоне Сибири // Агрохимия. 1972. № 6. С. 3-10.
157. Кремзин Н.М. Удобрение и химическая мелиорация солонцовых почв Кубани, используемых под рис. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1990. 23 с.
158. Кретинин В.М. Влияние лесных полос на питательный режим обыкновенного чернозема под озимой пшеницей // Агрохимия. 1979. № 2. С. 83-89.
159. Кретинин В.М. Передвижение нитратного азота в черноземе обыкновенном на лесомелиоративной территории // Почвоведение. 1976. № 11. С. 72-77.
160. Крупенников И.А. Черноземы: возникновение, совершенство, трагедии, деградация, пути охраны и возрождения. Кишинев: Понтос, 2008. 285 с.
161. Крупкин П.И., Крупкина Э.И. Прогнозирование эффективности минеральных удобрений под кукурузу на черноземах Средней Сибири. Кн.: Земельные ресурсы Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 111-119.
162. Крутских Л.П. Урожай и качество зерна ячменя при систематическом применении удобрений в зернопропашном севообороте на типичном черноземе ЦЧЗ. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Воронеж: ВГУ, 1995. 25 с.
163. Ксенда Т.В. Просо и гречиха в Красноярском крае. Красноярск: Кн. изд., 1980. 32 с.
164. Кузнецова Т.В., Ходжаева А.К., Семенова Н.А. и др. Минерализационно-иммобилизационная оборачиваемость азота в почве при разной обеспеченности разлагаемым органическим веществом // Агрохимия. 2006. №6. С. 6-12.
165. Куликов Н.Ф. Значение неучтенных корне-поживных остатков сои в повышении плодородия почв // Плодородие. 2004. № 6. С. 24-25.

166. Куликов С.В., Хамова О.Ф. Биологическая активность лугово-черноземной почвы в зависимости от удобрений // Плодородие. 2004. № 6. С. 23-24.
167. Куликова А.Х., Яшин Е.А., Данилова Е.В. Влияние диатомита и минеральных удобрений на урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы // Агрохимия. 2007. № 6. С. 27-31.
168. Кураков В.И., Никульников И.И., Боронтов О.К. Как сохранить плодородие чернозема // Сахарная свекла. 2003. № 1. С. 10-12.
169. Кутняк Е.Г. Продуктивность сахарной свеклы в зависимости от приемов возделывания на выщелоченном черноземе Западного Предкавказья. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук, Краснодар, КАУ. 1997. 29 с.
170. Кушниренко Ю.Д. Удобрения как фактор эффективного использования зерновыми культурами агроклиматических ресурсов Южного Урала. Сб.: Эффективность удобрений при различных погодных и климатических условиях М.: Тр. ВИУА. 1985. С. 26-33.
171. Ладонин В.Ф. Комплексное применение средств химизации. Кн.: Плодородие черноземов России (Под ред. Н.З. Милащенко) М.: Агроконсалт, 1998. С. 296-319.
172. Лазарев К.К. Влияние известкования и удобрения на азотный режим чернозема выщелоченного урожай и качество зерна яровой пшеницы в условиях Лесостепи среднего Поволжья. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 2001. 20 с.
173. Лебедева Т.Б., Надежкин С.М., Арефьева М.В. Трансформация растительного вещества и гумусовое состояние чернозема выщелоченного при использовании удобрений и известкование // Агрохимия. 2006. № 11. С. 18-24.
174. Левенец П.П., Вервейко Е.И., Кукова С.М., Лещева Е.И., Карачевцев А.Н., Козлов В.В. Влияние осветленных животноводческих стоков на миграцию питательных веществ в почве и содержание их в водах // Химия в сельск. хоз. 1983. № 3. С. 51-53.
175. Левин Ф.И. Количество растительных остатков в почвах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // Агрохимия. 1977. № 8. С. 36-43.
176. Левин Ф.И., Федоров В.А., Полевщиков С.И. Биологический круговорот элементов питания в посевах подсолнечника на типичном черноземе // Агрохимия. 1981. № 8. С. 47-52.
177. Ломако А.И., Акметов К.Н., Ибрагимов А.В. Влияние минеральных удобрений на урожай и качество зерна яровой пшеницы // Агрохимия. 1982. № 9. С. 55-61.
178. Лукин С.В. Агроэкологическое состояние и продуктивность почв Белгородской области. Белгород: Константа, 2011. 178 с.
179. Лукин С.В. Трансформация и баланс азота удобрения при осеннем внесении на разные глубины типичного чернозема // Агрохимия. 1992. № 12. С. 3-7.
180. Лукин С.В. Трансформация и эффективность азотных удобрений при внесении под сахарную свеклу на типичном черноземе ЦЧР. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: ВИУА, 1992. 20 с.

181. Лукин С.В. Эколого-агрохимические основы адаптивных систем земледелия для эрозионно-опасных и загрязненных тяжелыми металлами агроландшафтов в ЦЧР России. Автореф. дисс. ... докт. сельскохозяйственных наук. М.: ВНИИА, 1999. 40 с.

182. Лукин С.В., Черников В.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Оптимизация качества урожая. Белгород: Константа, 2014. 212 с.

183. Лукин С.В., Четверикова Н.С., Ероховец М.А. Агроэкологическая оценка содержания азота в сельскохозяйственных растениях и почвах Белгородской области. Научн. вед-ти Белгород. Гос. Ун-та. Сер. Естеств. науки. 2011. № 21. С. 95-101.

184. Лыков А.М. Воспроизводство плодородия почв в нечерноземной зоне М.: Россельхозиздат. 1982. 143 с.

185. Мазепин К.Г., Красных А.А. Действие повышенных доз удобрений на сахарную свеклу // Химия в сельском хозяйстве. 1977. №12. С. 8-10.

186. Макаров Б.Н. Газовый режим почв. М.: Агропромиздат, 1988. 105 с.

187. Макаров И.П., Муха В.Д., Кочетов И.С. и др. Плодородие почв и устойчивость земледелия (агроэкологические аспекты). М.: Колос, 1995. 288 с.

188. Макаров Р.Ф. Оптимизация пищевого режима типичного чернозема в связи с интенсификацией земледелия. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. М.: ВИУА. 1990. 36 с.

189. Макаров Р.Ф., Архипов В.В. Влияние удобрений на продуктивность севооборота и изменение его эффективности во времени на черноземе типичном // Агрохимия. 2001. № 4. С. 31-34.

190. Максютков Н.А., Кремер Г.А., Жданов В.М. Зональные особенности основной обработки почвы в Оренбургской области // Земледелие. 2001. № 1. С. 17-18.

191. Мальгин А.Е., Захаров Г.М., Крупская Т.Н., Земенков Н.А. Минерализационная активность чернозема выщелоченного в севооборотах при различных уровнях интенсификации // Агрохимия. 2014. № 1. С. 15-22.

192. Малюта Н.Г., Тарасенко Н.Д. Влияние условий выращивания и удобрений на величину урожая и качество зерна озимой пшеницы на Северном Кавказе. Эффективность удобрений при различных погодных и климатических условиях. М.: Тр. ВИУА, 1985. С. 71-79.

193. Маргун Ф.Т., Шикула Н.К., Гнатенко А.Ф. Почвозащитное земледелие. Киев: Урожай, 1983. 240 с.

194. Масютенко Н.П., Нагорная О.В. Динамика микробной биомассы в черноземе при разной антропогенной нагрузке // Плодородие. 2007. № 2. С. 47-49.

195. Масютенко Н.П., Нагорная О.В., Лукьянченкова О.В. Влияние удобрений, типа севооборота, экспозиции склона и вида угодий на динамику содержания микробной биомассы в черноземе типичном // Агрохимия. 2009. № 5. С. 49-54.

196. Махновская А.Д. Влияние минеральных удобрений на формирование микробных сообществ при разных условиях влажности и температуры почвы / Сб.: Структура и функции микробных сообществ с различной антропогенной нагрузкой. Киев. 1982. С. 168-171.

197. *Медведев С.Т.* Эффективность обработки почвы и удобрений в звене свекловичного севооборота в Центрально-Черноземной зоне. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Немчиновка: ВНИИ Агроекоинформ, 1996. 24 с.
198. *Мергель А.С., Семенов В.М., Соколов О.А.* влияние концентрированного очага азотных удобрений на азотный режим и ферментативную активность серой лесной почвы // Почвоведение. 1987. №12. С. 55-63.
199. *Милащенко Н.З.* Западная Сибирь, пути повышения продуктивности земледелия / Кн.: Плодородие черноземов России. М.: Агроконсалт, 1998. С. 603-626.
200. *Минакова О.А.* Агроэкологические аспекты применения удобрений в зернопаропропашном севообороте лесостепи ЦЧР: Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. Воронеж: ВГАУ, 2011. 49 с.
201. *Минакова О.А., Тамбовцева Л.В.* Изменение азотного режима чернозема выщелоченного и баланса азота в зерносвекловичном севообороте при длительном применении удобрений // Доклады РАСХН. 2016. № 2-3. С. 40-43.
202. *Минакова О.А., Тамбовцева Л.В., Александрова Л.В.* Влияние длительного применения удобрений на азотный режим чернозема выщелоченного и баланс азота в зернопаропропашном севообороте // Агрохимия. 2016. № 8. С. 11-22.
203. *Минакова О.А., Тамбовцева Л.В., Александрова Л.В.* Продуктивность сахарной свеклы на различных фонах основной удобренности при применении корневых и некорневых подкормок // Агрохимия. 2013. № 9. С. 40-47.
204. *Минакова О.А., Тамбовцева Л.В., Громовик А.И.* Влияние длительного применения минеральных удобрений и навоза на гумусовое и азотное состояние чернозема выщелоченного в зерносвекловичном севообороте лесостепи ЦЧЗ // Агрохимия. 2011. № 5. С. 18-25.
205. *Минеев В.Г., Карцев Ю.Г., Музыкантов П.Д.* О повышении эффективности удобрений в Центрально-Черноземной зоне // Химия в сельском хозяйстве. 1975. № 2. С. 3-8.
206. *Минеев В.Г., Сафрина О.С., Смолин В.Ю.* Влияние бактерий рода *Pseudomonas* на урожайность столовой свеклы и вынос азота растениями // Доклады ВАСХНИЛ. 1991. № 9. С. 26-31.
207. *Минеев В.Г., Щербакова Н.И., Громыко О.И.* Об эффективности удобрения озимой пшеницы в зависимости от климатических условий // HYPERLINK <<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=8384>> Аграрная наука. 1980. № 12. С. 28.
208. *Мишустин Е.Н.* Микроорганизмы и продуктивность земледелия. М.: Наука. 1972. 375 с.
209. *Мишустин Е.Н.* Удобрения и микробиологические процессы. Кн.: Агрохимическая микробиология. Л.: Колос. 1976. С. 191-204.
210. *Могилевкина И.А.* Фиксированный аммоний в почве и метод его определения // Почвоведение. 1964. № 2. С. 94-104.
211. *Морозов Н.В.* Использование макрофитов для очистки стока сельскохозяйственных угодий // Водные ресурсы. 1984. № 3. С. 131-141.

212. *Морозова И.Б.* Влияние удобрений на агрохимические свойства чернозема выщелоченного и урожайность озимой пшеницы в условиях Кубани. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1992. 25 с.

213. *Мухина М.Т.* Влияние регуляторов роста растений комплексного действия на фоне азотно-фосфорных удобрений на урожайность и качество в условиях Краснодарского края. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2017. 34 с.

214. *Мязин Н.Г.* Агроэкологическое обоснование интенсивного применения агрохимических средств в севооборотах ЦЧЗ. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. Воронеж: ВГУ, 1994. 44 с.

215. *Мязин Н.Г., Павлов Р.А., Шеина В.В.* Влияние удобрений на накопление нитратов и тяжелых металлов в почве и растениях и на продуктивность звена зернопаропропашного севооборота // *Агрохимия*. 2006. №2. С. 22-29.

216. *Надежкина Е.В.* Превращение азотных удобрений и их эффективность на черноземе выщелоченном лесостепного Поволжья. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: ВИУА, 1994. 14 с.

217. *Надежкина Е.В., Лебедева Т.Б.* Эколого-агрохимические приемы регулирования потерь азота удобрений в почвах // *Плодородие*. 2003. № 6. С. 25-27.

218. *Назарюк В.М.* Баланс азота в почве при внесении высоких доз азотных удобрений под овощные культуры // *Агрохимия*. 1983. № 7. С. 16-24.

219. *Назарюк В.М.* Баланс азота удобрений в зависимости от условий азотного питания овощных культур и картофеля // *Агрохимия*. 1989. № 2. С. 10-18.

220. *Назарюк В.М.* Баланс и трансформация азота в агроэcosystemах. Новосибирск: СОРАН. 2002. 257 с.

221. *Назарюк В.М.* Особенности минерального питания капусты на черноземе оподзоленном в условиях Приобья // *Агрохимия*. 1976. 34. С. 67-70.

222. *Назарюк В.М.* Почвенно-экологические основы оптимизации питания растений. Новосибирск: СО РАН, 2007. 240 с.

223. *Назарюк В.М.* Урожай и качество овощных культур и картофеля при применении возрастающих доз азотных удобрений // *Агрохимия*. 1988. № 11. С. 8-17.

224. *Назарюк В.М.* Эколого-агрохимические и генетические проблемы регулируемых агроэcosystem. Новосибирск: СО РАН, 2004. 240 с.

225. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р., Кашеваров Н.И.* Эффективность минеральных удобрений и растительных остатков при длительном использовании // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2010. Вып.1. С. 29-31

226. *Научные основы* предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. Т. 3. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2013. 296 с.

227. *Немченко В.И., Рябина Л.Д.* Эффективность систематического применения гербицидов и азотных удобрений при выращивании яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2007. № 3. С. 41-46.

228. *Никитин В.В.* Оптимизация минерального питания культур зерно-свекловичного севооборота на черноземах типичных юго-запада ЦЧЗ. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. М.: ВНИИ «Агроэкоинформ», 1998. 40 с.
229. *Никитин С.Н.* Оценка эффективности применения удобрений, био-препаратов и диатомита в лесостепи Среднего Поволжья. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 316 с.
230. *Никитин С.Н., Завалин А.А.* Влияние удобрений и биопрепаратов на продуктивность зерно-парового севооборота, потоки элементов питания и свойства чернозема выщелоченного в лесостепи Среднего Поволжья // *Агрохимия*. 2017. № 6. С. 12-29.
231. *Никитишен В.Н.* Опыт изучения глубинной миграции азота в почве / В кн.: Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Л., 1980. 73 с.
232. *Никифорова Л.И.* Безотвальная обработка и гумусовое состояние эродированных черноземов // *Земледелие*. 1989. № 3. С. 27-29.
233. *Никульников И.М., Безлер Н.В., Боронтов О.К.* Влияние удобрений и зяблевой обработки чернозема выщелоченного на почвенную микрофлору и продуктивность культур севооборота // *Агрохимия*. 2004. № 2. С. 5-12.
234. *Никульников И.М., Боронтов О.К.* Влияние системы удобрения и обработки почвы в севообороте на питательный режим чернозема выщелоченного и урожайность сахарной свеклы // *Агрохимия*. 2005. № 3. С. 15-21.
235. *Никульников И.М., Боронтов О.К.* Повышение плодородия черноземов // *Земледелие*. 2003. № 5. С. 30-31.
236. *Нимбуев Ш.Г.* Влияние различных доз и сочетаний органических и минеральных удобрений на урожайность и качество озимой пшеницы при выращивании на обыкновенном черноземе Северного Кавказа. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1999. 15 с.
237. *Новиков М.Н., Тужилин В.М., Самохина О.А., Лисятников И.Н., Комаров В.И.* Система биологизации земледелия в Нечерноземной зоне / Научно-практические рекомендации на примере Владимирской области. М.: Росинформагротех, 2007. 269 с.
238. *Нормативы выноса* элементов питания сельскохозяйственными культурами. М.: ЦИНАО. 1991. 65с.
239. *Овсянников А.В.* Превращение и использование яровой пшеницей азота удобрений и почвы на лугово-черноземной почве Зауралья. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1991. 19 с.
240. *Одум Ю.* Экология. М.: Мир. 1986. Т.1. 328 с.
241. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: МГУ, 1990. 325 с.
242. *Орлов Д.С.* Химия почв. М.: МГУ, 1985. 376 с.
243. *Осипов А.И., Соколов О.А.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 4 Роль азота в плодородии почв и питании растений. С.-Пб., 2001. 360 с.
244. *Павленко В.Ф.* Влияние минеральных удобрений и гербицидов на функционирование микробных сообществ почв с различной антропогенной нагрузкой. Киев, 1982. С. 180-184.

245. Панников В.Д., Верниченко Л.Ю. Теория и практика повышения плодородия почв // Вестник сельскохозяйственных наук. 1984. №3. С. 43-45.
246. Париткина О.М., Ключева Н.В. Микробиологические аспекты уменьшения естественного плодородия почв при сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1995. № 5. С. 573-581.
247. Парфенова О.А. Морфогенетические особенности антропогенных изменений почв. Центрального Черноземья. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Воронеж: ВГУ, 1997. 27 с.
248. Пигарева Н.Н. Баланс и трансформация азота удобрений в криоли-тозоне Забайкалья // Агрохимия. 2007. № 2. С. 23-28.
249. Полеско Ю.А., Бражник С.П., Колесникова З.М. Роль минеральных удобрений в мобилизации азота растительных остатков озимой пшеницы // Агрохимия. 1974. №2. С. 8-14.
250. Полянская Л.М., Суханова Н.И., Чакмазян К.В., Звягинцев Д.Г. Особенности изменения структуры микробной биомассы почв в условиях залежи // Почвоведение. 2012. № 7. С. 729-798.
251. Помазкина Л. В. Агрохимия азота в таежной зоне Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1985. 176 с.
252. Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В. Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэко систем на техногенно загрязненных почвах. Новосибирск: Наука. 1999. 208 с.
253. Попов А.И., Мергель А.А., Кураков А.В. Микробиологическое состояние и азотный режим серой лесной почвы при применении ингибиторов // Почвоведение. 1990. №6. С. 78-86.
254. Потапов В.И. Формирование урожая и качества ячменя и овса в различных условиях минерального питания. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1996. 19 с.
255. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / Под ред. А.В. Гордеева и Г.А. Романенко). М.: ФГНУ Росинформанротех. 2008. 68 с.
256. Прозоров А.С. Сроки и способы внесения удобрений и азотное питание яровой пшеницы // Агрохимия. 1985. № 8. С. 3-8.
257. Проценко Е.П., Караулова Л.Н. Влияние природных и агрогенных факторов на режим азота и биологическую продуктивность сельскохозяйственных культур в склоновом рельефе // Агрохимия. 2007. № 4. С. 37-45.
258. Прянишников Д.Н. Азот в жизни растений и в земледелии. М.-Л.: АН СССР. 1945. 196 с.
259. Родынюк И.С. Генетические и экологические факторы ассоциативной азотфиксации. Сб.: Биологическая азотфиксация азота. Новосибирск: Наука. 1991. С. 142-154.
260. Романычева А.А., Селиверстова О.М., Верховцева Н.В., Милановский Е.Ю. Сравнительный анализ структуры микробного сообщества и количества водопрочных агрегатов чернозема выщелоченного // Проблемы агрохимии и экологии. 2013. № 3. С. 30-34.
261. Рудай Н.Г. Эффективность удобрений. Кн.: Плодородие черноземов России. М.: Агроконсалт, 1998. С. 648-655.

262. Руделев Е.В. Минерализация-иммобилизация азота в основных типах почв России и эффективность азотных удобрений. Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. М.: ВИУА, 1992. 34 с.
263. Русинова И.П. Использование растениями азота удобрений при внесении их в разные сроки / Применение стабильного изотопа ^{15}N в исследованиях по земледелию. М.: Колос, 1973. С. 157-165.
264. Русинова И.П. Использование растениями азота удобрений при внесении их в разные сроки / Применение стабильного изотопа ^{15}N в исследованиях по земледелию. М.: Колос, 1973. С. 157-165.
265. Русский чернозем. 100 лет после Докучаева. М.: Наука. 1983. 191 с.
266. Рымарь С.В. Длительное применение различных способов основной обработки и плодородия чернозема обыкновенного // Земледелие. 2007. № 3. С. 22-23.
267. Рындыч Л.П., Явтушенко В.Е. Смысл питательных веществ из выщелоченного чернозема в почвозащитном севообороте // Почвоведение. 1987. №4. С. 117-123.
268. Савченко Г.И. Динамика поглощения питательных элементов сахарной свеклой на дерново-карбонатной типичной почве малого Полесья Западной Украины // Агрохимия. 1980. № 9. С. 69-72.
269. Саржанов Д.А. Экологическая оценка эмиссии парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) городских почвами различных функциональных зон Курска. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: РГАУ-МСХА, 2016. 24 с.
270. Сатаров Г.А. Плодородие черноземов и эффективность удобрений в Поволжье. М.: МГУ. 1999. 176 с.
271. Свистова И.Д., Стахурлова Л.Д., Щербаков А.П. Сукцессия микрофлоры чернозема в очаге локального внесения азотных удобрений // Агрохимия. 2003. № 3. С. 48-51.
272. Семенов В.М. Современные проблемы и перспективы агрохимии азота // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 1. С. 55-63.
273. Семенов В.М., Козут Б.М. HYPERLINK «<https://elibrary.ru/item.asp?id=25705091>» Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
274. Семенов В.М., Кузнецов А.М., Иванникова Л.А. и др. Активное органическое вещество почвы: Методика и результаты исследований / Кн.: Влияние длительного применения удобрений на органическое вещество почв. М.: ВНИИА, 2010. С. 124-160.
275. Семенов В.М., Семенов А.М., Ван Бругген А.Х.К. и др. Трансформация азота почвы и растительных остатков сообществом микроорганизмов и микроскопических животных // Агрохимия. 2002. № 1. С. 5-11.
276. Семенов В.М., Ходжаева А.К. Агроэкологические функции растительных остатков в почве // Агрохимия. 2006. №7. С. 61-81.
277. Середя Н.А. Сезонная многолетняя динамика плодородия черноземов Южного Урала. Автореф. дисс. ... докт. наук. М.: МГУ, 1999. 36 с.
278. Сивак Л.А., Марченко М.Т. Влияние доз и соотношений минеральных удобрений на урожай и качество сахарной свеклы // Агрохимия. 1973. № 2. С. 78-82.
279. Симакин А.И. Агрохимическая характеристика Кубанских черноземов и удобрения. Краснодар: Книж. из-во, 1969. 277 с.

280. *Симакин А.И., Ширинян М.Х.* Системы удобрения и продуктивность культур полевых севооборотов в связи с погодными условиями / Эффективность удобрений при различных погодных и климатических условиях. М.: Тр. ВИУА, 1985. С. 80-84.

281. *Смирнов П.М.* Вопросы агрохимии азота. М.: МСХА, 1977. 72 с.

282. *Смирнов П.М.* Превращение азотных удобрений в почве и их использование растениями. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М.: МСХА, 1970. 42 с.

283. *Смирнова Л.Г.* Эколого-ландшафтное обоснование почв в эрозионном рельефе юго-западной лесостепной провинции ЦЧЗ России. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М.: ВИУА, 2007. 42 с.

284. ...*Смирнова Н.Н., Васильева Е.Г. и др.* К вопросу эффективности использования азотных удобрений при возделывании риса // Агрохимия. 1976. № 1. С. 16-21.

285. *Смык А.В.* Научные основы управления плодородием почв Центрально-Черноземной зоны России. М.: Колос, 2000. 152 с.

286. *Соколов А.В.* Значение неравномерного распределения в почве питательных веществ и влаги для развития растений / Азотные и сложные удобрения. Тр. НИУИФ. 1937. Вып. 136. С. 182-202.

287. *Соколов А.В.* Распределение питательных веществ в почве и урожай растений. М.-Л.: АН СССР, 1974. 331 с.

288. *Соколов О.А.* Минеральное питание продуктивности и качество урожая растений Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М.: ВИУА, 1985. 40 с.

289. *Соколов О.А.* Минеральное питание растений в почвенных условиях М.: Наука, 1980. 193 с.

290. *Соколов О.А.* Обмен азотистых и фосфорных соединений у растений гречихи и формирование в зависимости от условий минерального питания. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: МСХА, 1970. 22 с.

291. *Соколов О.А.* Экологические аспекты применения азотных удобрений // Агрохимия. 1990. № 1. С. 3-14.

292. *Соколов О.А., Амелин А.А., Козлов М.Я., Кирикой Я.Т.* Модель поведения минерального азота в почве // Почвоведение. 1995. № 1. С. 56-62.

293. *Соколов О.А., Семенов В.М.* Действие азота удобрения на растения и почву при различных способах внесения азотных удобрений. Сообщ. 3. Локальное внесение азотных удобрений с осени // Агрохимия. 1982. № 9. С. 12-20.

294. *Соколов О.А., Семенов В.М.* Методология оценки азотного питания сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 1994. № 9. С. 137-149.

295. *Соколов О.А., Семенов В.М.* Теория и практика рационального применения азотных удобрений М.: Наука, 1992. 207 с.

296. *Соколов О.А., Семенов В.М., Силкина Н.В., Щербаков А.П.* Поведение азота в очаге при локализации азотных удобрений // Почвоведение. 1983. № 12. С. 25-35.

297. *Соколов О.А., Шмырева Н.Я., Цуриков Л.Н.* Изменение параметров потоков симбиотического азота при выращивании трав склона // Плодородие. 2010. № 4. С. 4-5.

298. *Станков Н.З.* Корневая система полевых культур. М.: Колос. 1964. 279 с.

299. Стахурлова Л.Д., Щербаков А.П. Влияние различных способов внесения азотных удобрений на динамику минеральных соединений азота и ферментативную активность чернозема выщелоченного // Почвоведение. 1996. № 8. С. 992-998.
300. Столыпин Е.И., Пожилов В.И., Щербинина Л.И. Система удобрения в зернопаровом севообороте в условиях орошения. Сб.: Результаты исследований в длительных опытах с удобрениями по зонам страны. М.: ВИУА, 1981. С. 43-59.
301. Стулин А.Ф. Влияние длительного применения удобрений в бесменном посеве кукурузы на ее продуктивность и вынос элементов питания на черноземе выщелоченном // Агрохимия. 2007. № 1. С. 25-30.
302. Стулин А.Ф. Накопление корневых и пожнивных остатков полевых культур в почве и содержание в них питательных веществ // Агрохимия. 1981. № 8. С. 70-75.
303. Ступаков А.Г. Агрохимическое обоснование системы удобрения зерносвекловичного севооборота на черноземе выщелоченном. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. Немчиновка: ВНИИ Агрэкоинформ, 1998. 36 с.
304. Супрун С.В. Влияние антропогенных факторов на плодородие почв, урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2008. 25 с.
305. Сычев В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Экологические аспекты азота в продукционном процессе. М.: ВНИИА. 2012. Т. 2. 272 с.
306. Танделов Ю.П. Плодородие почв и эффективность удобрений в Средней Сибири. М.: МГУ, 1998. 301 с.
307. Тарарико А.Г. Проблемы повышения продуктивности черноземных почв. Харьков: ВОП, 1983. 200 с.
308. Телегин В.А. Влияние длительного применения азотных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур и плодородие чернозема выщелоченного Курганской области. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: НИИСХЦРНЗ, 2007. 18 с.
309. Тембо А., Самардонич М., Морев Д.В., Валентини Р., Васенев И.И. Агроэкологический мониторинг почвенных потоков закиси азота в природных и агрогенно измененных черноземах Центрально-Черноземного Заповедника // Агрохимический вестник. 2014. № 5. С. 19-24.
310. Ткаченко Г.И., Пирогова Г.И. Использование пшеницей азота удобрений с разной глубины метрового профиля почвы. Кн.: Применение ^{15}N в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 68-70.
311. Трапезников В.К. Физиологические основы локального применения удобрений М.: Наука, 1983. 175 с.
312. Траутвах И.В. Динамика минерального азота в черноземе типичном на склонах и его потребление растениями. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Курск: КГСХА, 2000. 23 с.
313. Трещачев Е.П. Агроэкологические аспекты биологического азота в современном земледелии. М., 1999. 531 с.

314. *Туев Н.А.* Микробиологические процессы гумусообразования. М.: Агропромиздат, 1989. 237 с.
315. *Турчин Ф.В.* Азотное питание растений и применение азотных удобрений. М.: Колос, 1972. 335 с.
316. *Тюрин И.С.* Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 287 с.
317. *Тютюнов С.И., Соловиченко В.Д., Логвинов И.В.* Плодосменный севооборот – основной фактор сохранения и повышения плодородия почвы в Белгородской области // *Земледелие*. 2014. № 2. С. 11-14.
318. *Уваров Г.И.* Агроэкологические проблемы плодородия почв лесостепи. Белгород, 2005. 203 с.
319. *Уваров Г.И., Карабутов А.П.* Влияние удобрений и способов обработки почвы на содержание форм азота в черноземе типичном // *Агрохимия*. 2014. № 2. С. 13-19.
320. *Уваров Г.И., Соловиченко В.Д.* Азотный режим чернозема типичного при возделывании культур в севообороте // *Агрохимия*. 2009. № 4. С. 5-10.
321. *Узун В.Ф., Алексеева А.Н.* Азот в почвах Саратовской области // *Почвоведение*. 1973. № 4. С. 22-27.
322. *Фрунзе Н.И.* Разнообразие аминокислот чернозема типичного Молдавии // *Почвоведение*. 2014. № 12. С. 1483-1489.
323. *Фрунзе Н.И.* Фракционный состав азота почвы и его запасы // *Агрохимия*. 2015. № 8. С. 23-31.
324. *Хазиев Ф.Х.* Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. М.: Наука, 1982. 203 с.
325. *Хазиев Ф.Х., Агафарова Я.М.* Активность ферментов азотного обмена и динамика азота в черноземах. Сб.: Азотный фонд и биологические свойства почв Башкирии. Уфа, 1977. С. 41-69.
326. *Хазиев Ф.Х., Наумов Н.С.* Почвенный азот и эффективность азотных удобрений. Уфа, 1979. 127 с.
327. *Холодов В.А.* Способность почвенных частиц самопроизвольно образовывать макроагрегаты после цикла увлажнения и высушивания // *Почвоведение*. 2013. № 6. С. 698-706.
328. *Храмцов И.Ф., Безвиконный Е.В.* Гумусное состояние чернозема выщелоченного при длительном применении удобрений // *Агрохимия*. 1998. № 4. С. 25-28.
329. *Чагин Е.Г., Берхин Ю.И., Хацевич Н.И.* Изменение плодородия почв при интенсивном земледелии. Новосибирск, 1986. 172 с.
330. *Чекмарев П.А., Лукин С.В.* Итоги реализации программы биологизации земледелия в Белгородской области // *Земледелие*. 2014. № 8. С. 3-6.
331. *Чекмарев П.А., Лукин С.В., Четверикова Н.С.* Динамика кислотности черноземов в Белгородской области // *Земледелие*. 2010. № 8. С. 11-13.
332. *Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д.* Углерод микробной биомассы мучнисто-карбонатных черноземов Западного Забайкалья // *Агрохимия*. 2013. № 8. С. 3-10.
333. *Черепанов В.П.* Роль минеральных удобрений в накоплении растительных остатков // *Агрохимия*. 1979. № 1. С. 60-65.

334. Черкасов Г.Н., Пыхтин И.Г., Гостев А.В. Возможность применения нулевых и поверхностных способов основной обработки почвы в различных регионах // Земледелие. 2014. № 5. С. 13-16.
335. Черников В.А., Лукин С.В., Завалин А.А., Шмырева Н.Я., Соколов О.А. Потоки азота в агрофитоценозе при применении органических удобрений // Агрэкология. 2015. № 4. С. 18-22.
336. Черников В.А., Милащенко Н.З., Соколов О.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 3. Устойчивость почв к антропогенному воздействию. Пушино: ОНТИ, 2001. 203 с.
337. Черников В.А., Соколов О.А. Оценка воздействия сельскохозяйственного производства на почвы. М.: Сам Полиграфист, 2015. 120 с.
338. Чернов Г.И., Тхакахова А.К., Иванова Е.А. и др. Сезонная динамика почвенного микробиома многолетнего агрохимического опыта на черноземах Каменной Степи // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1483-1488.
339. Чуб М.П. Оптимизация минерального питания культур и система удобрения в севообороте на черноземах и темно-каштановых почвах засушливого Поволжья. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1989. 49 с.
340. Чуб М.П., Медведев И.Ф., Гурова Э.С. Черноземные почвы Поволжья, их распространение, состав и использование. Кн.: Плодородие черноземов России. М.: Агроконсалт. 1998. С. 509-592.
341. Чуб М.П., Потатурино Н.В., Пронько В.В., Сайфулина Л.Б. Влияние длительного применения удобрений на азотный режим южного чернозема засушливого Поволжья // Агрохимия. 2005. № 10. С. 5-12.
342. Чужан Н.А., Еремина Р.Ф., Черкасов Г.Н. Изменение запасов нитратного азота в различных слоях чернозема типичного при внесении соломы и растительных остатков с минеральными удобрениями // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2011. № 2. С. 35-37.
343. Шабаев А.И. Адаптивно-экологические системы земледелия в агроландшафтах Поволжья. Саратов, 2003. 284 с.
344. Шаов М.З. Гумусное состояние чернозема обыкновенного Кабардино-Балкарской республики при длительном применении удобрений и орошении. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук М.: ВНИИА, 2003. 24 с.
345. Шарков И.Н. Минимизация обработки и ее влияние на плодородие почвы // Земледелие. 2009. №3. С. 24-27.
346. Шатохина С.В., Христенко С.И., Ланта Л.И. Особенности функционирования основных азоттрансформирующих групп микроорганизмов в черноземе южном при различных системах удобрения // Агрохимия. 2000. № 9. С. 35-40.
347. Шафран С.А., Васильев А.И., Андреев С.С. Эффективность азотной подкормки различных сортов озимой пшеницы на черноземе выщелоченном // Агрохимия. 2008. № 2. С. 18-25.
348. Шевцова Л.К. Гумус черноземов и его изменение при интенсивном сельскохозяйственном использовании. Кн.: Плодородие черноземов России (Под ред. Н.З. Милащенко), М.: Агроконсалт, 1998. С. 196-224.
349. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53-61.

350. *Шелганов И.И.* Система повышения плодородия почв Центрально-Черноземной зоны. Кн. Плодородие черноземов России. М.: Агроконсалт, 1998. С. 363-402.
351. *Шукула Н.К., Гнатенко А.Ф.* Воспроизводство гумуса при почвозащитной системе земледелия // *Земледелие*. 1991. №2. С. 40-42.
352. *Шилова Е.И.* Доступность растениями фиксированного аммония в полевых условиях // *Агрохимия*. 1969. № 2. С. 3-10.
353. *Шилова Е.И.* Процессы мобилизации–иммобилизации азота в зависимости от различных условий. Кн.: применение ^{15}N в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 104-106.
354. *Шильников И.А.* Потери кальция и магния из пахотных почв // *Химия в сельском хозяйстве*. 1977. № 6. С. 23-28.
355. *Широких П.С.* Азот гумусовых веществ и трансформация азотных удобрений в пахотных почвах Омской области. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Новосибирск: МГУ. 1976. 14 с.
356. *Шиян П.Н.* Использование сахарной свеклой азота удобрений в зависимости от норм способов и сроков их применения // *Агрохимия*. 1980. № 12. С. 21-29.
357. *Шконде Э.И., Королева И.Е., Щербаков А.П.* Запасы и формы азота в черноземах Восточно-Европейской фации // *Агрохимия*. 1974. № 4. С.10-15.
358. *Шустрова Н.В.* Агроэкологическое обоснование дифференцированного применения удобрений в севообороте на склонах землях Центрального Черноземья. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Курск: КГСХА, 2000. 19 с.
359. *Щеглов Д.И.* Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. Воронеж: ВГУ, 1995. 46с.
360. *Щербаков А.П.* Азотсодержащие компоненты черноземов и серых лесных почв, их трансформация и роль в современном почвообразовании. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 1978. 89 с.
361. *Щербаков А.П., Годунов И.Б.* Азот в Обыкновенных черноземах Каменной Степи // *Агрохимия*. 1978. № 5. С. 3-8.
362. *Щербаков А.П., Дудкина А.Г., Кузнецова Г.И.* Влияние удобрений на биологическую активность выщелоченного чернозема Сб.: Проблемы почвоведения, агрохимии и мелиорации. Воронеж: ВГУ, 1973. С. 36-42.
363. *Щербаков А.П., Рудай И.Д.* Плодородие почв, круговорот и баланс питательных веществ. М.: Колос, 1983. 185с.
364. *Щербаков А.П., Свистова И.Д., Стахурлова Л.Д.* Биодинамика выщелоченного чернозема при локальном внесении мочевины и ингибитора нитрофикации КМП // *Вестн. с.-х. наук*. 1992. № 3. С. 130-134.
365. *Экологические* последствия применения агрохимикатов (удобрений). Пушкино: ОНТИ, 1982. 185 с.
366. *Эндрюс У.Б.* Применение органических и минеральных удобрений. М.: Ин. л., 1959. 399 с.
367. *Юмашев Н.П.* Приемы повышения эффективности удобрений на черноземных почвах Центрально-Черноземной зоны. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук М.: ВНИИА, 2011. 38 с.

368. Юмашев Н.П., Логошина Т.П. Известкование кислых почв в Тамбовской области // Плодородие. 2005. № 2. С. 30-31.
369. Юркин С.Н., Пименов Е.А. Роль корневых и пожнивных остатков зерновых культур и культур и кукурузы в аккумуляции азота, фосфора и калия // Агрохимия. 1977. № 11. С. 145-153.
370. Юшкевич И.А. Потери питательных веществ удобрений из дерново-подзолистых почв по данным лизиметрических исследований. Кн.: Применение лизиметрических методов в почвоведении агрохимии и ландшафтоведении. Л.: 1972. С. 139-146.
371. Явтушенко В.Е. Агроэкологическое обоснование систем удобрения на почвах склонов. Автореф. дисс. ... с.-х. наук. М.: БелНИИПА, 1991. 47 с.
372. Явтушенко В.Е. Использование азота растениями на эродированном выщелоченном черноземе Белгородской области. Кн.: Применение ^{15}N в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 73-75.
373. Явтушенко В.Е. Миграция и использование азота на склонах землях. Сб.: Азот-удобрения-почва-растение. Прага: СХИ, 1986. С.189-195.
374. Яговенко Л.Л., Такунов И.П., Яговенко Г.Л. Влияние люпина на свойство почвы при его запашке на сидерацию // Агрохимия. 2003. № 6. С. 71-80.
375. Ягодина М.С., Азаров Б.Ф. Биологический азот и органическое вещество бобовых в земледелии Центрально-Черноземной зоны. Кн.: Плодородие черноземов России (Под ред. Н.З. Милащенко), М.: Агроконсалт, 1998. С.254-265.
376. Ярошевич И.В. Влияние 50-летнего применения удобрений в севообороте на биологическую активность выщелоченного чернозема // Агрохимия. 1966. № 6. С. 21-24.
377. Blevins R.L., Thomas G.W., Smith M.S., Frye M.S. Changes in soil property after 10 years of continuous non-tilled and conventionally tilled corn // Soil Till. Res. 3. – P. 135-146.
378. Baligar V.C., Bennett O.L. NPK-fertilizer efficiency. A situation analysis for the tropics // Fert. Res. 1986. № 10. P. 147-163.
379. Carefoo J.M., Lindwall M., Nyborg M. Tillage-induced soil changes and related grain yield in a semi-arid region // Can. J. Soil Sci. 1990. V. 70. P. 203-214.
380. Carefoot J.M., Lindwall M., Nyborg J.M. Tillage induced soil changes related grain yield in a semi-arid region // Canad. J. of Soil Science. 1990. № 70. P. 203-214.
381. Cox W.J., Zobel W.J., R.W. Cox. Tillage effect on some soil and fertilizer nutrients // Agron. 1990. V. 82. P. 806-812.
382. Deane-Drummond C.E. Mechanism of nitrate uptake into Chara coralline cells lack of evidence for obligatory coupling to proton pump and a new $\text{NO}_3^-/\text{NO}_3^-$ exchange model // Plant Cell Environ. 1984. № 7. P. 317-323.
383. Dejaux J.F., Recous S., Meynard J.M. The fate nitrogen from winter-frozen rapeseed leaves: mineralization, fluxes to the iniroment and uptalce by rapeseed crop in spring. Plant and soil. 2000. V. 218, № 1-2, P. 257-272.
384. Doran J.W., Smith M.S. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients // In: Soil Fertility and Organic as Critical Component

of production Systems. Soil Science Society of America: Special Publication. 1987. № 19. P. 53-72.

385. *Fenn L.B., Fenn L.B.* Ammonia loss and associated reaction of urea in calcareous soils // Soil Sci. Soc. Am. 1981. № 45. P. 537-540.

386. *Gauer L.E., Shaykewich C.F., Stobbe E.N.* Soil temperature and soil water use under zero tillage in Manitoba // Can. J. Soil. Sci. – 1982. – № 62. – P. 311-327.

387. *Hargrove W.L., Kissel D.E., Fenn L.B.* Field measurement of ammonia volatilization from surface application of ammonia salts to a calcareous soil. Agric. 1977. J. 69. P. 473-476.

388. *Hoelt R.G., Keeney D.R., Walsh L.M.* Nitrogen and sulfur in precipitation and sulfur dioxide in the atmosphere in Wisconsin J. Environ. Qual. 1972. V. 1. P. 203-208.

389. *Jenkinson D.S.* Studies on decomposition of plant material in soil. The effect of plant cover and soil type on the loss of carbon from ¹⁴C-labeled rye grass decomposing under field conditions // J. Soil Sci. 1977. Vol. 28. № 3. P. 424-434.

390. *Lafond G.P., Loepky H., Dersken D.A.* The effect of tillage system and crop rotation on soil water conservation, seedling establishment and crop yield // Can. J. Plant Sci. 1992. № 72. P. 103-105.

391. *Malhi S.S., Nyborg J.M., Solberg E.D.* Influence of source, method of placement simulated rainfall on the recovery of ¹⁵N-labeled fertilizers under zero tillage // Canad. J. of Soil Science. 1996. № 76. P. 93-100

392. *Nyborg M., Malhi S.S.* Effect of zero and conventional tillage on barley yield and N-NO₃ content, moisture and temperature of soil in north-central Alberta // Soil Till. Res. 1989. № 15. P. 1-9.

393. *Phillips R.E., Blevins R.L., Thomas G.W., Frye W.W., Phillips S.H.* No tillage agriculture // Science. 1980. V. 208. P. 1108-1113.

394. *Rowell D.A., Stonebridge W.C., McNeill A.A.* The effect in a long term trial of minimum and reduced cultivation on wheat yields // Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry. 1977. № 17. P. 802-811.

395. *Terman, G.L.* Volatilization of nitrogen as ammonia from surface applied fertilizers, organic amendments and crop residues // Agron. J. 1979. № 31. P.189-223.

396. *Volk G.M.* Volatile loss of ammonia following surface application for no-till corn production // Agron. J.- 1959.- V.74. P. 823-826.

397. *McInness K. J., Ferguson R.B., Kissel D.E., Kanemasu E.T.* NH₃ loses from application of urea-ammonium nitrate solution to straw residue // Soil Sci. Soc. Am. J. 1986. № 50. P. 969-974.

398. *Mengel R.D., Nelson D.W., Nuber D.M.* Placement of nitrogen fertilizers for no-till and conventional till corn // Agron. 1982. № 74. P. 515-518.

399. *Malhi S., Nyborg M., Solberg E.* Influence of source, method of placement and simulated rainfall on the recovery of ¹⁵N-labeled fertilizers under zero tillage // Can. J. Soil Sci. 1996. № 76. P. 93-100.

400. *Malhi, S.S.* Effect of tillage and straw on yield and N uptake on barley grown under different N fertility regimes / S.S. Malhi, M. Nyborg, // Soil Till. Res. 1990. № 17. P. 115-124.

401. Lafond, G.P., Loepky H., Dersken D.A. The effect of tillage system and crop rotation on soil water conservation, seedling establishment and crop yield // Can. J. Plant Sci. 1992. № 72. P. 103-105.
402. Lemake R.L., Izaurralde R.C., Nyborg M., Solberg E.D. Tillage and N source influence soil-emitted nitrous oxide in the Alberta Parkland region // Can. J. Soil Sci. 1999. № 61. P. 247-253.
403. Carefoot J.M., Lindwall M., Nyborg M. Tillage-induced soil changes and related grain yield in a semi-arid region // Can. J. Soil Sci. 1990. V. 70. P. 203-214.
404. Cox W.J., Zobel R.W., Van Es H.M., Otis D.J. Tillage effect on some soil and fertilizer nutrients // Agron. 1990. V. 82. P. 806-812.
405. Doran J.W., Smith M.S. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients // In: Soil Fertility and Organic as Critical Component of production Systems. – Soil Science Society of America: Special Publication. – 1987. № 19. P. 53-72.
406. Hargrove W.L., Kissel D.E., Fenn L.B. 1977. Field measurement of ammonia volatilization from surface application of ammonia salts to a calcareous soil. Agric. J. 69 P. 473-476.
407. Baligar V.C., Bennett O.L. NPK-fertilizer efficiency. A situation analysis for the tropics // Fert. Res. 1986. № 10. P.147-163.
408. Blevins R.L., Smith M.S., Frye M.S. Changes in soil property after 10 years of continuous non-tilled and conventionally tilled corn // Soil Till. Res. 3. P. 135-146.
409. Nyborg J.M., Malhi S.S. Effect of zero and conventional tillage on barley yield and NO_3^- content moisture and temperature of soil in northcentral Alberta // Soil Tillage Research. 1989. № 15. P. 1-9.
410. Nyborg J.M., Solberg E.D., Izaurralde R.C. et al. Influence of long-term tillage straw and N fertilizer on barley yield, plant-N uptake and soil-N balance // Soil Tillage Research. 1995. № 36. P. 165-174.
411. Ogilvie L.A., Hirsch P.R., Johnston A.W.B. Bacterial diversity of the Broadbalk classical winter wheat experiment in relation to long-term fertilizer inputs // Microbial Ecology. 2008. V. 56. P. 525-537.
412. Trinsoutrot J., Recous S., Mary B., Nicolardot B. C and N fluxes of decomposing ^{13}C and ^{15}N Brassica napus: effect of residue composition and N content // Soil Biol. Biochem. 2000. V. 32. № 11-12. P. 1717-1730.
413. Viets F.G., Hageman R.H. Factors affecting the accumulation of nitrate in soil, water and plants. Agriculture Handbook // Agric. Res. Service. 1971. № 413. 63 p.
414. Volk G.M. Volatile loss of ammonia following surface application for no-till corn production // Agronomy. 1959. V.74. P. 823-826.
415. Volk, G.M. Efficiency of fertilizer urea as affected by method of application, soil moisture and lime / G.M. Volk // Agron. J. 1996. V.58. P. 249-252.
416. Zihlmann U., Weisskopf P., Muller M., Schafflutz R. Dynamique de l'azote dans les sols sous semis direct ou sous labour. Rev.suisse agr. 2006. V. 38. № 5. P. 262-268.

Научное издание

Алексей Анатольевич ЗАВАЛИН
Олег Алексеевич СОКОЛОВ
Нина Яковлевна ШМЫРЕВА

**АЗОТ В АГРОСИСТЕМЕ НА ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ
(К 125-летию экспедиции В.В. Докучаева в Каменную Степь)**

Публикуется в авторской редакции

*Издается по решению Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН)
и распространяется бесплатно*

Подписано в печать 24.04.2018 г. Формат 70х100 1/16.
Печ. листов 9,4. Усл. печ. листов 10,46. Тираж 300 экз.
Заказ № 41/24048

Издатель – Российская академия наук.
Оригинал-макет подготовлен ООО «Амирит»

Отпечатано в типографии ООО «Амирит»,
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.
Тел.: 8-800-700-86-33 | (845-2) 24-86-33
E-mail: zakaz@amirit.ru
Сайт: amirit.ru