Ф. В. ТУРЧИН

АЗОТНОЕ ПИТАНИЕ РАСТЕНИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ

Ф. В. ТУРЧИН



Москва
«КОЛОС»
1972



1902-1965

Ф. В. ТУРЧИН

***

избранные труды

ВСЕСОЮЗНАЯ ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК ИМЕНИ В. И. ЛЕНИНА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО УДОБРЕНИЯМ
И ИНСЕКТОФУНГИЦИДАМ ИМЕНИ Я. В. САМОЙЛОВА

АЗОТНОЕ ПИТАНИЕ РАСТЕНИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ

УДК 631.811.1 + 631.84

В книге выдающегося советского агрохимика Ф. В. Турчина приведены фундаментальные исследования в области азотного питания растений, а также результаты исследований агрохимических свойств и эффективности новых видов и форм азотных и комплексных удобрений. Освещены вопросы превращения азотных соединений в растениях и почве, показано значение минерального и биологического азота, даны расчеты потребности в удобрениях, а также определен рациональный их ассортимент.

В книгу, кроме того, вошли работы по ферментативной фиксации азота бобовыми растениями.

Рассчитана на научных сотрудников и агрономов.

Составители:

А. В. Соколов и Л. И. Оболенская

Турчин Федор Васильевич

АЗОТНОЕ ПИТАНИЕ РАСТЕНИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ. Избранные труды. М., «Колос», 1972.
336 с. с ил. (Всесоюз. акад. с.-х. наук им. В. И. Ленина. Науч.-исслед. ин-т по удобрениям и инсектофунгицидам им. Я. В. Самойлова.

Редактор С. А. Крылатова. Художник В. Е. Трепцов. Художественный редактор Л. М. Воронцова. Технический редактор Г. Б. Славнова. Корректор В. Л. Непомнящая.

Сдано в набор 9/II 1972 г. Подписано к печати 3/VII 1972 г. Т-10674. Формат 60 × 90¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Усл. печ. л. 21. Уч.-изд. л. 22,33. Изд. № 302. Тираж 4000 экз. Заказ № 201. Цена 1 р. 57 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос», Москва, К-31, ул. Дзержинского, д. 1/19.

Типография им. Котлякова издательства «Финансы» Комитета по печати при Совете Министров СССР. Ленинград, Садовая, 21.

4-3-6
54-72

ПРЕДИСЛОВИЕ

Федор Васильевич Турчин, выдающийся ученый-агрохимик, внес крупный вклад в развитие агрономической науки и практики.

Научная деятельность Ф. В. Турчина началась на Полесской сельскохозяйственной опытной станции Украины, где он работал в 1924—1930 гг. В эти годы он опубликовал исследования о биологическом поглощении азота в почве, о составе органического вещества песчаных почв и о применении на этих почвах удобрений. В 1927 г. Ф. В. Турчин командируется за границу для ознакомления с состоянием работ и методами исследований в агрохимических, биохимических и почвенных лабораториях.

В 1930 г. Ф. В. Турчин работает в Научном институте по удобрениям (НИУ), который в настоящее время носит название Научно-исследовательского института по удобрениям и инсектофунгицидам (НИУИФ), и с 1935 г. он заведует в этом институте лабораторией азота.

Уже в первые годы своей научной деятельности в этом институте Ф. В. Турчин проводит ряд блестящих исследований по агрохимической оценке различных форм минеральных удобрений: мочевины, аммонизированного суперфосфата и тройных комплексных удобрений. Одновременно он занимается теоретическими исследованиями в области питания растений и обмена веществ в них. Работы ученого о влиянии калия на азотный и углеводный обмены в растениях дали новые представления о роли калия в синтезе азотных органических соединений. Изучая влияние на окислительно-восстановительные процессы в растениях калия и фосфора, Ф. В. Турчин выявляет специфическую их роль в нитратном и аммиачном питании.

В дальнейшем работы Ф. В. Турчина охватывают все более широкий круг вопросов агрономической химии, питания растений и применения удобрений. Особенное значение получают его исследования в области азотного питания. Будучи инициатором применения в агрохимических исследованиях изотопного метода и широкого использования различных видов спектроскопических методов анализа, Ф. В. Турчин провел классические исследования о поступлении в растения и использовании в них для синтеза аминокислот и белка нитратных,

аммонийных и амидных форм азота. Ученым были экспериментально установлены последовательность образования в растении отдельных аминокислот и факт постоянного обновления белка, а также выявлен механизм этого явления как распада «старых» молекул белка и синтеза новых. Одновременно, используя в опытах тяжелый изотоп азота, Ф. В. Турчин исследовал процесс обновления хлорофилла, протекающий со скоростью, близкой к скорости обновления белка. В этих работах на новом экспериментальном материале подтверждаются и развиваются выводы, которые намечались в более ранних работах.

В последнее время Ф. В. Турчин сосредоточил свое внимание на процессах биологической фиксации азота. Он провел ряд весьма перспективных исследований в области ферментативного синтеза азотистых соединений. Эти работы позволили пересмотреть многие старые представления о биологической фиксации азота и поставить проблему промышленного использования этого процесса.

Широкие теоретические исследования Ф. В. Турчина всегда были тесно связаны с решением практических вопросов, имеющих огромное народнохозяйственное значение. Использование тяжелого изотопа при изучении превращений азотных удобрений в различных почвах позволило установить фактические размеры потерь этого элемента, происходящие в результате улетучивания из почвы свободного азота и его соединений, а также биологического поглощения данного питательного вещества микроорганизмами почвы. Работы по изучению азотного обмена в растениях позволили выявить возможность регулирования аминокислотного состава зерна, а следовательно, и его биологической ценности как продукта питания путем внесения азотных удобрений.

В работах Ф. В. Турчина отражено широкое всестороннее изучение всех существующих видов и форм азотных удобрений, а также многих видов комплексных удобрений. Эти исследования имели важное значение для организации производства удобрений в СССР и установления требований к их стандартам, а также для разработки путей рационального использования туков в сельском хозяйстве. Последние годы под руководством ученого проводились большие работы по агрохимической оценке жидких азотных удобрений, мочевины и невымываемых азотных удобрений.

Ф. В. Турчин принимал активное участие в разработке основных вопросов производства и применения удобрений, проводившейся в Министерстве химической промышленности СССР, в Министерстве сельского хозяйства СССР, в Госплане СССР, в Госэкономсовете и в других организациях.

Ф. В. Турчин в течение многих лет был ведущим специалистом по вопросам разработки потребности сельского хозяй-

ства в минеральных удобрениях и установления их оптимального ассортимента.

Наряду с многосторонней научной деятельностью Ф. В. Турчин уделял много времени подготовке научных кадров и пропаганде агрохимических знаний. Он был активным членом редколлегии журналов «Агрохимия» и «Химия в сельском хозяйстве», автором и редактором популярных книг и справочных руководств, председателем секции Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева.

В настоящем сборнике публикуется только часть работ Ф. В. Турчина, которые сгруппированы в три раздела: I — Азотные и сложные удобрения; II — Превращение азотных соединений в растениях и почве; III — Общие вопросы азотного питания растений и применения удобрений. Несмотря на то что работы были опубликованы несколько лет назад, они сохранили свою актуальность до нашего времени.

В некоторых работах Ф. В. Турчина встречаются повторения, неизбежные при публикации последовательно углубляемых исследований.

Библиография работ Федора Васильевича Турчина, помещенная в сборнике, дает представление об огромной, исключительно разнообразной, плодотворной научной и практической деятельности талантливого ученого.

Член-корреспондент АН СССР
доктор сельскохозяйственных наук
А. В. Соколов,
кандидаты сельскохозяйственных наук
Л. И. Королев и
Л. И. Оболенская

АЗОТНЫЕ И СЛОЖНЫЕ УДОБРЕНИЯ

ПРЕВРАЩЕНИЕ МОЧЕВИНЫ В ПОЧВЕ *

За последнее время в иностранной, главным образом во французской, литературе появилось сравнительно много работ, посвященных изучению мочевины.

Укажем на работы Ch. Brioux [1], который приравнивает мочевину по ее действию на урожай к селитре и сернокислому аммонию, и на работы, опубликованные в годовых отчетах Французского агрономического исследовательского института, где приводятся данные о хорошем действии мочевины по различным районам Франции. Хорошие результаты были получены при внесении мочевины под овес, картофель, свеклу в Бретани (опыты Vincent [2]) и под табак в Кольмаре (опыты M. Guyon [2]).

Наряду с этими данными, характеризующими мочевину как хорошее азотное удобрение, встречаются указания и на то, что мочевина действует гораздо хуже, чем другие азотные удобрения. Так, в опытах Rousseau [2] действие мочевины составляло 75% от действия селитры (N_x** — 91%, N_a — 86%). На опытной станции в Авиньоне (Bordas et Mathieu [3]) действие разных форм азота на картофель выражалось такими цифрами (эффект $N_c = 100$): N_a — 96, N_x — 84, $N_м$ — 73, без азота — 67. Слабое действие мочевины последние авторы объясняют недостаточным разложением мочевины в почве.

Как известно, мочевина под влиянием различных бактерий, выделяющих фермент уреазу, превращается в $(NH_4)_2CO_3$. Авторы полагают, что почва опытов была недостаточно богата бактериями, гидролизирующими $CO(NH_2)_2$, мочевина слабо разлагалась, в результате чего наблюдалось ее слабое действие. В пользу такого предположения говорят опыты тех же авторов с совместным внесением (картофель, баклажаны) мочевины и небольших количеств навоза или фермента уреазы, полученного из сои. Лабораторные исследования авторов показали, что гидролиз $CO(NH_2)_2$ в почве значительно ускоряется в присутствии уреазы.

В СССР полевые и вегетационные опыты с мочевиной, проведенные НИУ на различных почвенных разностях Союза [4],

---

* Статья опубликована в журнале «Удобрение и урожай» № 6, 1931.

** N_x — хлористый аммоний, N_a — сернокислый аммоний, N_c — селитра натронная, $N_м$ — мочевина.

показывают, что по действию на урожай мочевину можно поставить в один ряд со стандартными формами азота — $NaNO_3$ и $(NH_4)_2SO_4$.

Методика наших опытов была такова: к 150 г почвы прибавлялась в определенных дозах $CO(NH_2)_2$; почва увлажнялась до 60% от полной влагоемкости и ставилась в термостат при 25—27° С; через определенные промежутки времени почва анализировалась на NO_3, NH_4 и $CO(NH_2)_2$, в некоторых случаях еще определялась pH. $CO(NH_2)_2$ определялась разложением ее уреазой с последующим титрованием образовавшегося аммиака 0,02 н. H_2SO_4. Этот метод очень прост и дает вполне надежные результаты. Уреаза приготовляется из размолотых семян сои. К 5 г размолотых семян сои прибавляют 100 см³ 30%-ного алкоголя, встряхивают 20 минут и фильтруют. Прозрачный фильтрат обладает сравнительно хорошей активностью. 10 см³ фильтрата разлагают 10 мг $CO(NH_2)_2$ в течение 10 минут при 18° С. Для разложения того же количества мочевины потребуется гораздо меньше фермента, если удлинить время его действия. В проведении опытов принимали участие химик А. Г. Кирьянова и аналитики Р. М. Старосельская и О. С. Постникова.

Влияние доз фермента уреазы на гидролиз мочевины. Время действия фермента 10 мин.; t° 18° С; $CO(NH_2)_2 = 10$ мг.

Уреаза в см³										
0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
Разложилось $CO(NH_2)_2$ в % от внесенной дозы										
9,4	16,6	27,2	39,0	46,0	61,0	70,5	81,5	89,0	95,0	99,9

Влияние времени действия фермента на гидролиз мочевины. $CO(NH_2)_2 = 10$ мг.

Разложилось $CO(NH_2)_2$ в процентах от взятой дозы:

Время в мин.											
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	20ч
1 см³ фермента											
11,0	20,2	25,0	30,7	33,5	44,2	44,8	51,0	51,0	55,0	70,5	96,0
2 см³ фермента											
21,5	33,0	38,0	55,0	55,5	63,0	65,8	71,8	76,0	86,0	—	99,0

2 см³ раствора фермента вполне достаточно для разложения 10 мг $CO(NH_2)_2$ в продолжение 20 часов. Поэтому к водной вытяжке из почвы (50 см³) мы прибавляли 2 см³ фермента и через 24 часа титровали образовавшийся аммиак. Для контроля титровалось 50 см³ вытяжки без прибавления фермента.

В тех случаях, когда вытяжка почему-либо окрашена и титрование невозможно, мочевина определяется следующим образом: раствор, содержащий мочевину, переносится в кругло-

донную кьельдалевскую колбу на 100—150 $см^3$; колба закрывается каучуковой пробкой с двумя отверстиями; в одно вставляется трубка, нижний конец которой погружается в раствор, а верхний над пробкой расширяется в воронку. В другое отверстие вставляется согнутая под углом трубка, нижний конец которой находится немного ниже пробки, а верхняя согнутая часть соединяется с холодильником. Этот последний соединен с приемником, погруженным в титрованный раствор H_2SO_4. Приемник соединяется с водоструйным насосом, колбу устанавливают на водяной бане t° 45—55° С. В раствор прибавляют 2—5 $см^3$ фермента в зависимости от количества мочевины, фосфатный буфер (K_2HPO_4), 2 $см^3$ насыщенного раствора Na_2CO_3 и пропускают через аппарат ток воздуха. Через 30—40 минут отгон NH_3 заканчивается (после контроля на полноту отгона NH_3).

Так как с повышением температуры активность уреазы сильно возрастает, то 2 $см^3$ раствора уреазы достаточно для разложения 10 мг $CO(NH_2)_2$ в течение 20 минут.

Влияние температуры на скорость гидролиза мочевины уреазой. Количество фермента — 2 $см^3$; количество $CO(NH_2)_2$ — 20 мг N.

Разложилось $CO(NH_2)_2$ в мг:

Время действия фермента в мин.	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
3	0,69	0,84	1,34	1,34	2,18	2,56	3,60	4,56	6,30	6,64
5	1,03	1,16	1,81	2,30	2,86	4,44	4,12	5,56	7,00	10,70
10	1,50	1,94	2,26	2,94	5,04	6,16	7,80	8,70	13,10	13,90
20	2,40	3,60	4,00	5,60	8,68	9,48	13,50	15,40	16,8	—

Ввиду того что в почве всегда содержатся различные соли, могущие оказать известное влияние на работу фермента, мы изучали влияние некоторых солей на активность уреазы. Оказалось, что KCl, NaCl, K_2SO_4, Na_2SO_4, $CaCl_2$, $MgCl_2$ и H-ион в больших концентрациях ослабляют действие фермента. В небольших концентрациях влияние этих солей незаметно. Ничтожное количество Cu инактивирует фермент. Вещества, растворенные в водной вытяжке из почвы, совершенно не влияют на активность фермента, в чем мы убедились на специально проведенном опыте.

Перейдем к рассмотрению результатов исследований по превращению мочевины в почве.

Опыт 1. Для опыта было взято 7 почвенных разностей: 2 вида подзолистого суглинка Долгопрудного опытного поля НИУ (ДОП), карбонатная почва из Закавказья (совхоз «Аляты»), подзол Псковской опытной станции, чернозем из Краснодара, песчаная почва Новозыбковской опытной станции и деградированный чернозем Носовской опытной станции.

С этими почвами были заложены компосты по схеме: 1) 0; 2) 330 мг N $CO(NH_2)_2$ на 1 кг почвы.

Целью опыта было определение уреалитической способности названных почв, поэтому и доза мочевины бралась очень высокая. Через 48 часов компосты анализировались.

Содержание N в мг/кг почвы (NH_4 в солевой вытяжке)

Почва	Схема	NH_4	NO_3	$CO(NH_2)_2$	pH
				Водная вытяжка	
ДОП I	О	5,1	31,8	0	—
(подзол)	Мочевина	200,0	13,3	100,0	—
ДОП II	О	30,0	18,1	0	6,2
(подзол)	Мочевина	235,0	20,2	103,0	6,7
Псковская	О	18,7	32,7	0	6,4
(подзол)	Мочевина	246,3	15,8	118,0	7,0
Краснодарская	О	Следы	12,1	0	—
	Мочевина	149,0	15,4	125,0	—
Носовская	О	1,7	13,7	0	6,4
(деградированный чернозем)	Мочевина	133,0	15,4	180,0	6,9
Новозыбковская	О	—	3,2	0	—
(песок)	Мочевина	—	0	220,0	—
Закавказская	О	3,1	11,0	0	—
(карбонатная)	Мочевина	65,8	7,1	280,0	—

Из этих данных следует, что разные почвы обладают различной уреалитической способностью. Наиболее интенсивно эта способность выражена в северных подзолистых почвах (ДОП, Псков) и в краснодарской почве. Потом идет почва Носовской станции и, наконец, почва песчаная Новозыбковской станции и закавказская карбонатная, уреалитическая способность которых в сравнении с северными подзолами в несколько раз меньше.

В литературе тоже встречаются указания, что в щелочных почвах гидролиз мочевины идет слабее. Об этом говорит, например, Gibson [6], который нашел, что быстрее всего мочевина разлагается в пастбищных и лесных почвах с pH 5,4—6,1 и слабее в щелочных и очень кислых торфяных почвах. Полевые опыты Bordas et Mathieu, где было констатировано слабое действие мочевины, также были проведены на известковых щелочных почвах.

По Waksmann [7], уробактерии лучше всего развиваются в среде со щелочностью 2—3 г $(NH_4)_2CO_3$. По С. И. Кузнецову, оптимум pH для Urobaccilus Ducloxii 7,4—7,7, для Ur. Macdoxii 8,2. Поэтому не приходится думать, что причиной замедленного разложения мочевины на щелочных почвах является их щелочная реакция. Возможно, что здесь скорее сказывается влияние солей кальция, которые в высоких концентрациях ослабляют активность уреазы. Что же касается песчаной почвы Новозыбковской станции, то пониженная ее активность,

вероятно, объясняется относительно бедным бактериальным населением.

Вообще же разложение мочевины в почве протекает очень энергично; за 2 дня некоторые почвы (ДОП и псковская) разложили около 200 мг мочевины. Это и понятно, так как уробактерии населяют почву в очень больших количествах. По Waksmann, уробактерии составляют примерно 1—2% от всей почвенной микрофлоры. Видов их очень много. Большинство из них относится к аэробной группе. По Lohnis, среднее число уробактерий в 1 г почвы — 50 тыс., а по Millard — значительно больше — 27 500 тыс.

В нашем опыте, когда разложение мочевины происходило очень интенсивно, наблюдалось частичное исчезновение нитратов. Везде было заметно повышение pH, что находится в прямой зависимости от образования аммиака.

Опыт 2. Почвы: подзол ДОП, чернозем Харьковской станции и песчаная почва Новозыбковской станции. Почва компостировалась с мочевиной 24 часа. Дозы $CO(NH_2)_2$ — 33 и 330 мг N из расчета на 1 кг почвы.

Содержание в мг/кг почвы

Почвы и схема	NH_4 (солевая вытяжка)	$CO(NH_2)_2$ (водная вытяжка)
ДОП (подзол)		
0	15,75	0
33 мг N	60,5	0
330 мг N	156,2	198,0
Харьковская (чернозем)		
0	Следы	0
33 мг N	31,8	Следы
330 мг N	104,0	189,0
Новозыбковская (песок)		
0	6,55	0
33 мг N	26,1	10,9
330 мг N	53,5	207,0

Из таблицы видно, что доза мочевины в 33 мг N полностью разлагается за один день в почвах Харьковской станции и ДОП. В песчаной почве Новозыбковской станции та же доза не успевает полностью разложиться за один день, примерно 30—25% остается в почве в неразложившемся состоянии. При повышении дозы до 330 мг N за то же время почва разлагает значительно больше мочевины. В подзоле ДОП и харьковском черноземе разложились 130—140 мг N, а в песчаной почве в 2 раза меньше.

Надо полагать, что мочевина, внесенная в почву в обычных полевых дозах, за один день целиком превращается в карбонат аммония. Поэтому мочевину отчасти можно рассматривать как $(NH_4)_2CO_3$.

Таблица 1

Почвы и схема	Через 10 дней		Через 20 дней		Через 40 дней	
	NO_3*	NH_4*	NO_3	NH_4	NO_3	NH_4
ДОП						
О	24,3	Следы	—	Следы	54,4	3,0
NH_4Cl	24,3	141	67,0	—	50,0	126,4
$(NH_4)_2SO_4$	26,5	133,5	136,8	71,6	43,4	112,2
CO $(NH_2)_2$ + HCl	19,6	158,7	24,6	—	39,1	102,0
CO $(NH_2)_2$ + H_2SO_4	15,1	158,7	58,6	—	54,4	111,2
CO $(NH_2)_2$	28,1	129,7	127,0	—	123,0	58,6
Закавказская						
О	16,4	Следы	44,5	82,2	24,0	1,8
NH_4Cl	8,0	Не определяли	20,9	87,9	70,3	32,3
$(NH_4)_2SO_4$	12,6	83,5	65,9	92,2	190,0	6,3
CO $(NH_2)_2$ + HCl	11,0	123,4	61,8	—	195,0	1,9
CO $(NH_2)_2$ + H_2SO_4	14,4	85,0	95,4	—	176,0	1,6
CO $(NH_2)_2$	12,4	94,9	103,8	—	177,0	1,1
Носовская						
О	12,4	Следы	25,3	Следы	22,2	1,5
NH_4Cl	11,0	176,2	22,8	56,6	25,1	139,6
$(NH_4)_2SO_4$	18,8	112,2	37,0	70,2	44,5	12,1
CO $(NH_2)_2$ + HCl	12,4	112,2	30,0	—	22,2	99,6
CO $(NH_2)_2$ + H_2SO_4	5,1	88,2	47,0	—	59,5	70,8
CO $(NH_2)_2$	23,0	91,3	71,0	—	89,0	32,0
Харьковская						
О	23,0	12,3	40,4	9,4	40,4	1,3
NH_4Cl	10,1	—	39,9	83,8	51,0	37,6
$(NH_4)_2SO_4$	22,5	—	62,4	93,2	83,4	32,2
CO $(NH_2)_2$ + HCl	25,0	112,2	39,0	—	74,6	23,0
CO $(NH_2)_2$ + H_2SO_4	34,6	—	71,6	—	125,6	17,0
CO $(NH_2)_2$	44,9	72,6	143,0	—	164,4	18,0
Краснодарская						
О	12,3	3,6	21,4	8,6	16,4	1,2
NH_4Cl	9,3	193,0	40,9	119,6	48,3	48,6
$(NH_4)_2SO_4$	26,5	178,8	—	107,6	90,4	31,3
CO $(NH_2)_2$ + HCl	7,9	195,0	38,7	—	71,6	41,6
CO $(NH_2)_2$ + H_2SO_4	30,0	112,8	90,4	—	121,2	26,0
CO $(NH_2)_2$	39,1	120,0	110,2	—	123,0	15,6
Новозыбковская						
О	14,0	5,9	24,3	—	12,8	2,4
NH_4Cl	5,1	184,8	21,6	—	13,5	131,5
$(NH_4)_2SO_4$	Следы	187,0	43,9	—	7,6	92,2
CO $(NH_2)_2$ + HCl	Следы	—	7,0	—	15,9	111,7
CO $(NH_2)_2$ + H_2SO_4	3,8	156,6	5,9	—	9,4	101,6
CO $(NH_2)_2$	9,7	164,1	9,4	—	35,5	64,4

* В мг N на 1 кг почвы.

Опыт 3. В задачу опыта входило определение скорости нитрификации мочевины. Для опыта было взято 6 почв: подзол ДОП, харьковский чернозем, песчаная почва Новозыбковской станции, карбонатная закавказская почва, деградированный чернозем Носовской станции и краснодарский чернозем. Были заложены компосты с мочевиной (150 мг из расчета на 1 кг почвы). Для сравнения были также заложены компосты NH_4Cl и $(NH_4)_2SO_4$.

Для выяснения влияния подкисления почвы на нитрификацию мочевины были заложены компосты с мочевиной с прибавкой H_2SO_4 и HCl в количествах, эквивалентных содержанию SO_4 и Cl в $(NH_4)_2SO_4$ и NH_4Cl. Компосты вскрывались через 10, 20 и 40 дней.

Эти данные показывают, что мочевина, как правило, нитрифицируется гораздо быстрее, чем другие аммиачные удобрения (табл.) 1.

К концу опыта, т. е. через 40 дней, когда в некоторых почвах (харьковский чернозем) N мочевины полностью перешел в нитрат, нитрификация NH_4Cl была едва заметна, а $(NH_4)_2SO_4$ нитрифицировался всего лишь на 25%.

Внесение в почву вместе с мочевиной HCl и H_2SO_4 сказалось весьма отрицательно на скорости нитрификации мочевины. Особенно резко угнетает нитрификацию HCl. Так как и NH_4Cl нитрифицируется значительно медленнее, чем $(NH_4)_2SO_4$, то надо полагать, что здесь сказывается специфическое влияние Cl-иона. На кислых почвах ДОП и Носовской станции вредное влияние Cl и SO_4 сказывается сильнее, чем на харьковском черноземе и щелочной закавказской почве. Однако, хотя внесение HCl и H_2SO_4 почти не изменило pH харьковской и закавказской почвы, влияние Cl и SO_4 было все же достаточно сильным.

Интересно, что и $(NH_4)_2CO_3$ нитрифицируется значительно медленнее, чем $CO(NH_2)_2$. Очевидно, избыток аммиачного азота угнетает работу нитрификаторов. Вероятно, когда образование карбоната аммония происходит при распаде $CO(NH_2)_2$, в почве устанавливается другое, более благоприятное для жизнедеятельности нитрификаторов равновесие.

Если для ускорения гидролиза мочевины в почву внести фермент уреазу, то превращение мочевинного азота в нитратный происходит медленнее, нежели в почве, где этот процесс протекает обычным путем без прибавки уреазы. Так, например, в почву вносилось 150 мг N из расчета на 1 кг почвы; через 40 дней было найдено NO_3 в мг N на 1 кг почвы: $(NH_4)_2CO_3$ — 115,0, $CO(NH_2)_2$ + уреаза — 75,7, $CO(NH_2)_2$ без уреазы — 176,5.

Скорость нитрификации мочевины зависит от характера почвы и связанного с ним биологического режима почвы. На почвах нейтральных и щелочных, где нитрифицирующие организмы находятся в лучших экологических условиях, мочевина превращается в нитрат наиболее интенсивно. Подзолистая поч-

ва отстает от этих почв. Еще медленнее идет превращение мочевины в деградированном черноземе Носовской станции. Выше было отмечено, что и гидролиз мочевины до аммиака идет слабее в этой почве. По всей вероятности, биологическая деятельность носовской почвы ниже, чем у других названных здесь почв.

Хуже всего нитрифицируется мочевина в песчаной почве Новозыбковской станции. Здесь к концу опыта N мочевины перешел в нитрат всего лишь на 15%. Азот NH_4Cl и $(NH_4)_2SO_4$ совершенно не нитрифицировался. По $(NH_4)_2SO_4$ содержание нитратного азота в почве было даже ниже, чем в контрольном образце. Не менее резко повлияла на нитрификацию мочевины прибавка к почве H_2SO_4 и HCl. В работе Г. А. Кулика [8], проведенной на Полесской опытной станции, тоже было констатировано, что Cl и SO_4 угнетают нитрификацию в песчаной почве.

Очень медленная нитрификация в песчаной почве, вероятно, объясняется слабой буферностью песчаных почв, а так как взятые в опыте дозы были довольно высокими, то влияние Cl и SO_4 выразилось чрезвычайно резко.

В дополнение к лабораторным опытам были поставлены еще и вегетационные опыты, в задачу которых входило выяснение влияния на урожай ускорения гидролиза мочевины путем прибавки уреазы или небольших количеств навоза.

Урожай сухого вещества овса в г на сосуд на трех почвах составил:

Схема	Люберецкая почва	Тамбовская почва	Каунчинская почва
NH_4HCO_3	15,7	40,1	51,2
$CO(NH_2)_2$	16,6	40,4	49,2
$CO(NH_2)_2$ + навоз	16,6	42,9	50,7
$CO(NH_2)_2$ + фермент	14,7	40,3	50,2

Действие $CO(NH_2)_2$ и NH_4HCO_3 на урожай примерно одинаково, и инокуляция почвы ферментом или навозом не сказывается более или менее заметно на действии мочевины.

Разложение мочевины в различных почвенных типах идет довольно бурным темпом, и поэтому какое-либо ускорение этого процесса не представляется необходимым. Может быть, в каком-нибудь исключительном случае разложение мочевины и будет происходить настолько медленно, что потребуется его искусственное ускорение. O. Loew [9], например, нашел, что в некоторых почвах отсутствуют бактерии, разлагающие мочевину, но таких почв, видимо, существует немного, потому что разлагающие мочевину бактерии являются самыми распространенными представителями почвенной микрофлоры.

Выводы

1. Мочевина очень быстро превращается в почве в аммиачную форму. Мочевина в количестве, в несколько раз превышающем обычную полевую дозу, полностью гидролизируется в почве за 24 часа.

Уреалитическая способность почв подзолов ДОП и Псковской станции и харьковского чернозема выражена очень резко, уреалитическая способность песчаной почвы и щелочной закавказской почвы значительно слабее.

2. Азот мочевины нитрифицируется в почве сравнительно быстро, во всяком случае значительно быстрее, чем азот аммиачных солей, нитрификация которых очень задерживается из-за наличия в их составе анионов Cl и SO_4.

Совместное внесение SO_4-, Cl-ионов и мочевины сильно задерживает ее нитрификацию. Cl-ион сильнее угнетает нитрификацию, чем SO_4-ион.

3. Инокуляция почвы ферментом уреазой или навозом замедляет скорость нитрификации мочевины, на урожай овса эта инокуляция никакого влияния не оказывает.

4. Мочевина нитрифицируется в почве гораздо быстрее, чем $(NH_4)_2CO_3$.

5. Быстрая разлагаемость мочевины в почве позволяет считать это удобрение одной из хороших форм азота для всех почв Союза, за исключением сильно щелочных. Высокое содержание азота (46%) и отсутствие в ней балласта повышают ее удобрительную ценность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ch. Brioux. Action de l'urée comme engrais azoté. Annales de la Science Agronom. 1925, N 2.
2. Rapport sur le fonctionnement de l'Institut des Recherches Agronomiques. Отчеты за 1925, 1928, 1929 гг.
3. Bordaset Mathieu. Action de l'urée dans les terrains d'alluvions quaternaires du Comtat Venaissin. Annales de la Science Agronom., 1929, N 5.
4. Бельский В. П. Действия главнейших форм азотных удобрений. «Удобрение и урожай», № 7—8, 1930.
5. Ратнер Е. И. Сравнение форм азотистых удобрений. «Удобрение и урожай» № 4, 1930.
6. Gibson T. The Decomposition of Urea in soils. The Journal of Agricultural Science, v. XX, p. 4, 1930.
7. Waksmann S. A. Principles of soil Microbiology.
8. Кулик Г. А. О влиянии хлоридов и сульфатов на нитрификацию азотных удобрений. «Удобрение и урожай» № 8, 1931.
9. Loew O. Zentralbl. für Bact. und Parasit. II Abt. 70, 1927.
10. Кузнецов С. И. К вопросу о потерях азота при хранении торфяного и соломенного навоза. Труды НИУ, вып. 76.

АГРОХИМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ МОЧЕВИНЫ *

Мочевина является самым концентрированным азотным удобрением. Высокое содержание в мочевине азота (46%) дает этому туку значительные преимущества при транспорте удобрений, особенно в условиях дальних перевозок.

Физические свойства мочевины также достаточно удовлетворительны. Гранулированная мочевина обладает хорошей рассеваемостью и сравнительно хорошо хранится.

С агрохимической стороны мочевина до последнего времени была менее изучена, чем сульфат аммония, натронная селитра, нитрат аммония и другие формы азотных удобрений. В ряде опытов, проведенных как в СССР, так и за границей, наряду с хорошим действием мочевины наблюдались и случаи неустойчивого ее действия.

В полевых опытах географической сети Научного института по удобрениям [1] с рядом культур на различных почвах Союза мочевина дала почти такие же результаты, как и сульфат аммония. Так, например, на почвах черноземного комплекса различные формы азота на кислом калийно-фосфатном фоне (суперфосфат и калийная соль) дали такие прибавки урожаев корней сахарной свеклы: мочевина — 33,7 ц/га; сульфат аммония — 30,2; натронная селитра — 55,2 ц/га. Как видно из этих данных, наиболее эффективной формой азота для сахарной свеклы является натронная селитра, которая действует не только своим азотом, но и содержащимся в ней натрием.

На щелочном калийно-фосфатном фоне мочевина была несколько менее эффективна, чем сульфат аммония, при этом в отдельных опытах она давала весьма низкие прибавки.

Изучение действия мочевины на урожай хлопчатника на карбонатных почвах Средней Азии и Закавказья показало, что в этих условиях мочевина часто дает несколько пониженные результаты в сравнении с другими формами азота.

На урожай льна на подзолистых почвах мочевина в среднем также действовала несколько слабее, чем сульфат аммония.

За границей полевые опыты проводились в широком масштабе во Франции [2]. Отчеты о них опубликованы за ряд лет (1925—1933 гг.) в Rapport sur le fonctionnement de l'Institut des recherches Agronomiques.

В этих опытах мочевина в большинстве случаев оказывала примерно такое же действие, как и сульфат аммония, в ряде же случаев действие мочевины было выше и размер прибавок урожая от внесения мочевины приближался к величине прибавок, полученных от кальциевой и натронной селитры.

---

* Статья опубликована в журнале «Минеральные удобрения и инсектофунгисиды» № 2, 1935.

Однако в некоторых опытах, проведенных преимущественно на известковых почвах, эффективность мочевины была очень низка. Так, например, на опытной станции в Авиньоне в опытах Bordas и Mathieu [3] были получены такие урожаи картофеля по различным формам азота (в относительных цифрах):

Без азота	$CO(NH_2)_2$	NH_4Cl	$(NH_4)_2SO_4$	$NaNO_3$
63	73	84	96	100

Наблюдавшееся в ряде опытов, преимущественно на карбонатных почвах, неустойчивое действие мочевины некоторые авторы пытались объяснить слишком медленным превращением мочевины в почве в аммиачную форму азота. Неразложившаяся мочевина слабее используется растениями и даже может оказать на них вредное действие.

Как известно, мочевина в почве разлагается уробактериями, а также некоторыми другими группами бактерий в карбонат аммония: $CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightleftarrows (NH_4)_2CO_3$.

Bordas и Mathieu, в опытах которых мочевина действовала очень слабо, высказали предположение, что взятая для опыта с мочевиной известковая почва была очень бедна уробактериями, гидролизирующими мочевину в карбонат аммония. Для проверки этого предположения они вводили в почву вытяжку из навоза, где уробактерии всегда присутствуют в большом количестве, или же инокулировали почву разлагающим мочевину ферментом уреазой (получаемым из бобов сои). Введение в почву вытяжки из навоза или небольшого количества уреазы ускоряло разложение мочевины в почве и повышало ее эффективность.

Нужно, однако, сказать, что случаи слабого разложения мочевины в почве, по-видимому, весьма редки и объяснение неустойчивости действия мочевины слабой разлагаемостью ее в почве может быть правдоподобным только в весьма ограниченном числе случаев. Как правило, уробактерии населяют почву в очень больших количествах. По Waksmann [4], уробактерии составляют примерно 1—2% от всей почвенной микрофлоры. Бактерии, разлагающие мочевину, представлены в почве сравнительно большим количеством видов, большинство из них относится к аэробной группе. По Millard, среднее число уробактерий в 1 г почвы около 27—28 млн.

В наших опытах, проведенных еще в 1930—1931 гг. [5] на всех участвовавших в опытах основных почвенных разностях Союза, мочевина очень быстро превращалась в карбонат аммония.

Так, в одном лабораторном опыте мочевина вносилась в почву в количестве 33 мг N на 1 кг почвы. Через 24 часа после внесения мочевины был произведен анализ почвы на содержание в ней аммиака и мочевины (табл. 1).

Таблица 1

Почва	Количество внесенной $CO(NH_2)_2$ в почву, мг N	Найдено в почве через 24 часа, мг N	
		NH_3, солевая вытяжка	$CO(NH_2)_2$, водная вытяжка
Подзолистая почва Долгопрудного опытного поля	0	15,75	0
То же	33,0	60,50	0
Харьковский чернозем	0	Следы	0
То же	33,0	31,80	0
Песчаная почва Новозыбковской опытной станции	0	6,55	0
То же	33,0	26,10	10,9

Из таблицы видно, что сравнительно высокая доза мочевины полностью разлагается за 24 часа в подзолистой почве ДОП и в Харьковском черноземе и только на песчаной почве мочевина не успела за тот же срок разложиться полностью.

При внесении в почву очень больших количеств мочевины (из расчета 330 мг N на 1 кг почвы) на всех изучавшихся почвах через 48 часов после внесения значительная часть внесенной мочевины превращалась в карбонат аммония (табл. 2).

Таблица 2

Почва	Количество внесенной мочевины, мг N на 1 кг почвы	Найдено в почве через 48 час. после внесения мочевины, мг N на 1 кг почвы		Количество разложившейся мочевины за 48 час., мг N на 1 кг почвы
		NH_3	$CO(NH_2)_2$	
Подзолистая почва ДОП	0	5,1	0	—
То же	330	200	100	233,0
» »	0	30,0	0	—
» »	330	235,0	103,0	230,0
Подзолистая почва Псковской станции	0	18,7	0	—
То же	330	246,3	118	215
Чернозем кубанский	0	Следы	0	—
То же	330	149,0	125	218
Деградированный чернозем Носовской станции	0	1,7	0	—
То же	330	133	180	153
Песчаная почва Новозыбковской станции	0	—	0	—
То же	330	Не определяли	220	113
Карбонатная почва из Закавказья	0	3,1	0	—
То же	330	65,8	280	53

Эти данные показывают, что все исследованные почвы способны разлагать за короткий срок достаточно большие количества мочевины. Однако по интенсивности разложения мочевины песчаная почва и особенно карбонатная почва заметно отстают от других почв. Что касается песчаной почвы, то пониженная ее активность, вероятно, объясняется относительно бедным бактериальным населением.

В отношении карбонатных почв и в литературе встречаются указания на более слабую способность щелочных почв разлагать мочевину. Причиной замедленного разложения мочевины в карбонатных почвах, по-видимому, является некоторое инактивирующее влияние избытка кальция на фермент уреазу.

Однако вся мочевина при внесении ее на песчаных и карбонатных почвах в дозе 150 мг N на 1 кг почвы (т. е. в дозах, превышающих в 10 раз самую высокую дозу, вносимую в полевых условиях) целиком превращается в карбонат аммония.

Образующийся карбонат аммония на первых порах смещает реакцию почвы в щелочную сторону. В дальнейшем карбонат аммония сравнительно быстро нитрифицируется, и почва вследствие образования азотной кислоты подкисляется.

Таким образом, мочевина является биологически кислым удобрением. Подкисляющее действие мочевины на почву выражено значительно слабее, чем у таких физиологически кислых азотных удобрений, как сульфат аммония или хлористый аммоний.

Отсутствие в мочевине Cl или SO_4 весьма благоприятно сказывается на скорости ее нитрификации в почве.

В таблице 3 приводятся результаты наших исследований по нитрификации мочевины и аммиачных удобрений в различных почвах Союза.

Эти данные показывают, что мочевина, как правило, нитрифицируется гораздо быстрее, чем сернокислый и хлористый аммоний. Уже через 20 дней после внесения удобрения в почву значительно большая часть внесенной мочевины перешла в нитратную форму. За это же время сульфат аммония нитрифицировался в среднем всего лишь на 15—20%, а хлористый аммоний нитрифицировался еще слабее, а в некоторых случаях даже угнетал нитрификацию почвенного азота.

Так как мочевина нитрифицируется в почве гораздо быстрее, чем аммиачные удобрения, то, казалось бы, в тех условиях, где нитратный азот почему-либо имеет преимущество перед аммиачным, мочевина должна быть более эффективной формой азота, чем аммиачные удобрения. Полевые вегетационные опыты показывают, что в ряде случаев это действительно имеет место.

Мы приведем здесь результаты вегетационного опыта, проведенного с ячменем на подзолистой супеси Люберецкого опытного поля (табл. 4). Дозы удобрений: N — 0,5 г; P_2O_5 — 0,5 г; K_2O — 0,65 г; P вносился в форме $Ca(H_2PO_4)_2$.

Таблица 3

Почва	Удобрения в дозах 150 мг N на 1 кг почвы	Найдено в мг на 1 кг почвы		
		через 20 дней	через 40 дней	
		NO_3	NH_3	NO_3
Подзолистая почва ДОП	О	Не определяли	3,0	54,4
То же	NH_4Cl	67,0	126,4	50,0
» »	$(NH_4)_2SO_4$	—	112,2	43,4
» »	$CO(NH_2)_2$	127,0	58,6	123,0
Карбонатная почва из Закавказья	О	44,5	1,8	24,0
То же	NH_4Cl	20,9	32,3	70,3
» »	$(NH_4)_2SO_4$	65,9	6,3	190,0
» »	$CO(NH_2)_2$	103,8	1,1	177,0
Чернозем харьковский	О	40,4	1,3	40,4
То же	NH_4Cl	39,9	37,6	51,0
» »	$(NH_4)_2SO_4$	62,4	32,2	83,4
» »	$CO(NH_2)_2$	143,0	18,0	164,4
Чернозем краснодарский	О	21,4	1,2	16,4
То же	NH_4Cl	40,9	48,6	48,3
» »	$(NH_4)_2SO_4$	—	31,3	90,4
» »	$CO(NH_2)_2$	110,2	15,6	123,0

Таблица 4

Форма азота	Без РК		Р		Р+КСl		Р + K_2SO_4	
	общий	зерно	общий	зерно	общий	зерно	общий	зерно
О	12,5	5,45	10,12	4,8	13,2	6,5	12,3	5,3
$NaNO_3$	31,5	14,8	36,3	17,4	35,9	17,8	37,2	18,1
$(NH_4)_2SO_4$	14,5	4,3	14,1	4,3	22,7	8,4	24,3	9,6
$CO(NH_2)_2$	19,9	7,7	19,9	7,5	25,8	11,2	31,7	14,6

Наибольшие урожаи ячменя на легкой подзолистой супеси были получены по натронной селитре. Даже без фона РК урожай по $NaNO_3$ был достаточно высоким. Самый низкий урожай в условиях опыта был по сульфату аммония. Без калийно-фосфатного фона или на фоне фосфора урожай по сульфату аммония был почти равен урожаю без удобрения.

По мочевине урожай как без РК, так и при внесении одного Р был выше, чем по сульфату аммония, но значительно ниже, чем по $NaNO_3$. Интересно, что при внесении Р урожай по $NaNO_3$ заметно повысился, урожай же как по мочевине, так и по сульфату аммония остался на том же уровне. Наоборот, внесение, кроме Р, еще и калийного удобрения резко повысило эффективность сульфата аммония и особенно мочевины.

В комбинации с P и K_2SO_4 мочевина дала почти такой же урожай, как и натронная селитра. На действие натронной селитры внесение в почву вместе с фосфором калия не оказало заметного влияния.

Таким образом, при использовании аммиачных удобрений калий играет весьма большую роль. В использовании нитратных форм азота калий, по-видимому, имеет меньшее значение. Для использования натронной селитры в условиях этого опыта фосфор имел преимущественное значение. Отметим, что результаты этого опыта хорошо согласуются с данными других наших исследований по выяснению значения калия и фосфора в использовании растением различных форм азота.

Более высокий урожай по мочевине, чем по сульфату аммония, в условиях этого опыта объясняется, по-видимому, меньшей кислотностью мочевины. Ячмень отрицательно реагирует на повышение кислотности почвы. В таблице 5 приведены результаты определения кислотности почвы из сосудов после уборки ячменя (анализы А. М. Лазарева).

Таблица 5

Удобрения	pH	Обменная кислотность, см³ 0,1 н. NaOH на 100 г почвы	Гидролитическая кислотность, см³ 0,1 н. NaOH на 100 г почвы
PK (фон)	5,12	0,34	11,5
Фон + $(NH_4)_2SO_4$	4,69	0,99	14,5
Фон + $CO(NH_2)_2$	4,89	0,55	13,0

Подкисляющий эффект мочевины в условиях этого опыта был примерно в 2 раза слабее подкисляющего действия сульфата аммония.

Таким образом, в условиях кислых почв, при культуре растений, чувствительных к повышению почвенной кислотности, мочевина является более эффективной формой азота, чем такие физиологически кислые аммиачные удобрения, как сульфат аммония и хлористый аммоний.

Наряду с хорошим действием мочевины в ряде опытов наблюдались иногда случаи более слабого ее действия.

По-видимому, в этих случаях решающим моментом являются особенности превращения мочевины в почве. Карбонат аммония, как известно, в условиях местного подщелачивания среды легко диссоциирует на свободный аммиак и CO_2. Образующийся аммиак при непосредственном контакте его с ростками растений может оказывать на них вредное влияние. Это отрицательное влияние аммиака должно наиболее резко сказаться на щелочных карбонатных почвах и на растениях, чувствительных к аммиаку. Как наши опыты, так и литературные

данные действительно показывают, что случаи более слабого действия мочевины обычно относятся к щелочным почвам.

При заблаговременном внесении мочевины вследствие быстрой нитрификации этот отрицательный момент должен устраняться. Также и при тщательном перемешивании мочевины с почвой действие ее должно улучшаться.

Более резкие отрицательные результаты может дать такое внесение мочевины, при котором возле семян или под семенами будут сравнительно высокие концентрации удобрения. Таким образом, эффективность мочевины в значительной степени должна зависеть от техники ее внесения.

В вегетационных опытах Г. Ш. Асланяна [7], проведенных в НИУ в 1932 г., мочевина при внесении ее в непосредственном соприкосновении с высеянными растениями сильно поражала всходы хлопчатника на карбонатном сероземе и сахарной свеклы на черноземе. Менее заметно в этих условиях отрицательное влияние сульфата аммония. Мочевина, внесенная под семена, совершенно погубила всходы хлопчатника и на 60% снизила всходы сахарной свеклы. При равномерном же распределении удобрений по всей массе почвы мочевина, как и другие формы азота, не оказывала отрицательного влияния на всходы хлопчатника и сахарной свеклы.

Совсем другая картина наблюдалась в опытах Г. Ш. Асланяна с овсом на подзолистой почве. Отрицательное действие мочевины при внесении под семена оказалось меньше, чем отрицательное действие селитры и сульфата аммония.

Вредное влияние мочевины при внесении ее под хлопчатник и сахарную свеклу в контакте с семенами, по-видимому, прежде всего является результатом отравления молодых растений аммиаком, образующимся при разложении мочевины. Опыт с овсом хорошо согласуется с существующими представлениями о чувствительности различных растений к аммиаку. По Д. Н. Прянишникову [8], наиболее чувствительны к аммиаку ростки семян, относительно богатых белками и бедных углеводами. Наоборот, ростки семян, богатых углеводами, сравнительно легко переносят избыток аммиака в питательной среде. Семена хлопчатника и сахарной свеклы относительно бедны углеводами, а семена овса, наоборот, богаты ими.

Степень вредности аммиака в значительной степени может зависеть и от анатомических особенностей растений. Свекла и хлопчатник имеют только один стержневой корень, отмирание которого связано с гибелью всего растения. Овес же обладает мочковатой корневой системой и поэтому должен быть более стойким.

Имеются основания полагать, что наиболее токсически на растения действует свободный аммиак, который и образуется в щелочных почвах или даже при местном подщелачивании среды в результате распада карбоната аммония. NH_4-ион, при-

сутствующий в сульфате аммония, менее токсичен, чем свободный аммиак, так как последний, с одной стороны, поступает в растения сильнее, чем NH_4, из солей аммония и, с другой стороны, создает ядовитую для нежных ростков аммиачную атмосферу.

Мы предположили, что отрицательное влияние мочевины при непосредственном соприкосновении ее с ростками растений может быть в значительной степени устранено путем внесения в тесном контакте с мочевиной калийных солей. Для такого предположения имелись следующие основания: 1) калий, как показали наши исследования [9], ускоряет переработку аммиака в растении, 2) наличие подвижного аниона SO_4'' и в особенности Cl' в составе калийного удобрения должно вследствие реакции обмена между калийной и углеаммиачной солью, образующейся в почве из мочевины, препятствовать образованию токсически действующего свободного аммиака.

Для проверки этих предположений были поставлены вегетационные опыты по следующей схеме:

1) азотные удобрения, K_2O и P_2O_5 вносятся обычно, т. е. равномерно распределяются по всему сосуду;

2) P_2O_5 и K_2O вносятся равномерно по всему сосуду, а доза азота распределяется только в пунктах, прилегающих к посаженным семенам (семена отделялись от удобрения только небольшой прослойкой почвы);

3) P_2O_5 распределяется по всему сосуду, а N и K_2O вносятся вместе, как в предыдущем случае, под семена.

P_2O_5 в опыте давалась в форме $CaHPO_4$, K_2O — в форме KCl и K_2SO_4. Дозы: N — 0,25 г; P_2O_5 — 0,25 г; K_2O — 0,4 г на сосуд.

Опыты проводились с сахарной свеклой и с овсом на мощном черноземе из Граковской агрохимбазы. В сосуд (20 × × 20 см) высаживалось 50 семян.

Овес оказался совершенно нечувствительным ни к формам N и K_2O, ни к способу их внесения, количество развивающихся ростков было везде одинаково (46—50 шт.). На дальнейшее развитие растений овса форма и способ внесения удобрений также не оказывали какого-либо влияния. Таким образом, и здесь получили подтверждение указания о нечувствительности овса к аммиаку.

Что же касается сахарной свеклы, то здесь наблюдалась совершенно иная картина. В таблице 6 приведены результаты учета взошедших и окрепших ростков сахарной свеклы.

Натронная селитра при всех способах ее внесения дала примерно одинаковые результаты: везде были получены хорошие ростки сахарной свеклы.

Такие же результаты дали мочевина и нитрат аммония при обычном их внесении. Но при внесении мочевины под семена ростки сахарной свеклы на 75% погибали. Значительно слабее,

Таблица 6

Азотные удобрения	Обычное внесение удобрений (NPK)	P и K по всему сосуду, N под семена	P по всему сосуду, N + KCl под семена	P по всему сосуду, N + K_2SO_4 под семена
$NaNO_3$	47	46	43	45
NH_4NO_3	49	32	46	48
$CO(NH_2)_2$	48	12	49	46

чем в случае мочевины, но все же довольно заметно сказалось отрицательное влияние нитрата аммония при внесении его под семена.

При внесении же под семена, в тесном контакте с мочевиной или с нитратом аммония, хлористого или сернокислого калия, вредное влияние этих форм азота в условиях «гнездового» внесения на ростки сахарной свеклы полностью устранялось. При равномерном распределении калия по всему сосуду вредное влияние мочевины не устранялось.

В этом опыте не было расчленено влияние составных компонентов калийной соли. Некоторое представление по этому вопросу могут дать результаты опыта, проведенного в 1934 г. с сахарной свеклой на мощном харьковском черноземе. Для того чтобы можно было посеять больше растений, опыт был проведен в больших кристаллизаторах — размером 25 см в диаметре и 7 см высоты. В такой кристаллизатор высевалось 42 семени. Для того чтобы ослабить вредное влияние аммиака, образующегося в первые дни при внесении мочевины в почву, посев производился непроросшими семенами. Дозы удобрений: N — 0,42; P_2O_5 — в форме $Ca(H_2PO_4)_2$ — 0,42 г; K_2O в форме KCl — 0,63 г на сосуд (3 кг почвы). При гнездовом внесении удобрений на каждое растение приходилось 10 мг N, 10 мг P_2O_5 и 15 мг K_2O. Удобрения вносились в растворах: в 1 $см^3$ раствора содержалось 20 мг N, 20 мг P_2O_5 и 30 мг K_2O.

Схема опыта была построена в основном по принципу схемы предыдущего опыта. Особенностями этой схемы являются: а) введение в опыт звена с гнездовым внесением под семена растений смеси азотных, фосфорных и калийных удобрений; b) внесение под семена азота вместе с кали-фосфатом, последний приготовлялся смешением растворов K_2HPO_4 и KH_2PO_4, взятых в таких количествах, чтобы содержание P_2O_5 и K_2O в готовой смеси было равно 0,42 г P_2O_5 и 0,65 г K_2O на сосуд; при внесении в гнезда под семена кали-фосфата вместе с азотом влияние подвижного аниона Cl' или SO_4'' должно быть устранено; PO_4-ион в почвенных условиях вследствие связывания его в труднорастворимые фосфаты малоподвижен; с) внесение в гнезда под семена вместе с азотом хлористого натрия; P_2O_5 и K_2O и в этом случае распределялись по всему сосуду.

Урожай надземной массы сахарной свеклы был учтен через 30 дней после появления всходов (табл. 7).

Таблица 7

Формы азота	NPK, равномерное распределение всех удобрений по сосуду	NPK, азот внесен в гнезда возле семян, PK — равномерно по сосуду	NPK, азот и калий внесены в гнезда, фосфор — равномерно по сосуду	NPK, все удобрения внесены в гнезда	N + калифосфат. Все удобрения внесены в гнезда	NPK + NaCl, азот и NaCl внесены в гнезда, PK — равномерно по сосуду
	Сырой вес, г/сосуд					
Без азота *	47	—	—	—	—	—
$NaNO_3$	162	160	166	177	148	200
$(NH_4)_2SO_4$	129	119	137	140	125	187
$CO(NH_2)_2$	129	100	140	141	129	187
NH_4NO_3	131	155	148	140	128	182
	Сухое вещество, г/сосуд					
Без азота	4,2	—	—	—	—	—
$NaNO_3$	12,0	12,2	12,3	14,9	11,3	15,7
$(NH_4)_2SO_4$	9,1	9,4	10,8	12,2	9,2	12,0
$CO(NH_2)_2$	10,2	7,3	10,7	12,3	9,9	11,8
NH_4NO_3	10,3	11,8	10,4	12,3	9,9	10,8

* Урожай без удобрения: сырой вес 23,0 г, сухое вещество 2,22 г на сосуд.

Из таблицы 7 видно, что лучшей формой азота для сахарной свеклы во всех случаях была натронная селитра, что, повидимому, объясняется как наличием в этом туке всего азота в нитратной форме, так и некоторым дополнительным эффектом от натрия.

Сульфат аммония, мочевина и нитрат аммония при равномерном распределении их в почве дали примерно одинаковые результаты. В том же случае, когда азотные удобрения вносились в гнезда под семена, а калийно-фосфатные удобрения распределялись равномерно по всему сосуду, мочевина в сравнении со всеми другими удобрениями дала резкое снижение урожая. Это угнетающее действие мочевины было особенно резко в первое время после появления всходов.

При внесении в гнезда вместе с азотным удобрением хлористого калия действие мочевины резко повышалось. В этом случае по мочевине был такой же урожай, как по нитрату аммония и по сульфату аммония. В общем урожай свеклы при гнездовом внесении азотных удобрений совместно с калийными был примерно таким же, как и в случае равномерного распределения удобрения по всей почве.

Внесение в гнезда вместе с мочевиной кали-фосфата также выравнило действие мочевины. Правда, в этой комбинации урожай по всем формам азота был несколько снижен.

Внесение в гнезда с азотными удобрениями хлористого натрия сказалось весьма благоприятно на действии всех форм азота. По-видимому, сам натрий играет какую-то роль в питании сахарной свеклы. Какой-либо депрессии от гнездового внесения мочевины в этом случае не было заметно. Остается предположить, что либо роль калия в устранении депрессии от гнездового внесения мочевины играл в этом случае далеко не безразличный для сахарной свеклы натрий, либо, что более вероятно, при взаимодействии хлористого натрия с образующимся из мочевины карбонатом аммония возможность образования свободного аммиака была ограничена.

Интересные данные получены в этом случае, когда все удобрения вносились в гнезда под семена; здесь были получены самые высокие урожаи свеклы. По всем формам азота урожай сухого вещества свеклы был примерно на 20—25% выше, чем при равномерном распределении удобрений в почве. Таким образом, несмотря на то, что в условиях данного опыта концентрация питательных веществ была много выше, чем в полевых условиях, все же локализация в прикорневой зоне уравновешенного по своему составу удобрения давала заметное преимущество перед обычным внесением удобрений.

Выводы

1. Мочевина быстро превращается в почве в карбонат аммония. Скорость превращения мочевины в почве весьма велика. Мочевина, внесенная в условиях лабораторного опыта в почву в количестве, значительно превышающем обычную полевую дозу, полностью разлагается до карбоната аммония в течение одного-двух дней. Наиболее быстро разлагается мочевина на черноземных и подзолистых почвах, а на песчаных и карбонатных почвах — менее интенсивно.

2. Так как образующаяся в почве при нитрификации мочевины азотная кислота поглощается растениями, то подкисляющее влияние ее на почву выражено значительно слабее, чем у сульфата аммония и других балластных аммиачных удобрений. В условиях вегетационных опытов на оподзоленной легкой супеси подкисляющий эффект мочевины был примерно в 2 раза слабее подкисляющего действия сульфата аммония.

3. Мочевина вследствие быстрой нитрификации ее в почве и сравнительно умеренной биологической кислотности является на кислых почвах для растений, чувствительных к повышенной почвенной кислотности, более эффективной формой азота, чем сульфат аммония и другие балластные аммиачные удобрения.

4. При распределении в почве частиц мочевины вблизи высеваемых семян (местное внесение удобрений) в условиях вегетационного опыта наблюдалось резкое понижение всхожести и отставание в росте чувствительных к аммиаку растений (сахарная свекла и хлопчатник). Внесение (опыты с сахарной свеклой) в тесном контакте с мочевиной калийных удобрений совершенно устраняет отрицательное влияние мочевины в этих условиях.

5. Проведенные исследования дают основания предполагать, что проявляющаяся иногда, преимущественно на щелочных почвах, неустойчивость действия мочевины обусловлена отрицательным влиянием образующегося при распаде мочевины в почве аммиака. Вредное влияние образующегося из мочевины аммиака может быть полностью устранено путем внесения в тесном контакте с мочевиной калийных удобрений.

6. Локализация полной комбинации удобрений (NPK) возле высеваемых семян, независимо от формы азота, входящей в состав этой комбинации, и в условиях вегетационного опыта, где концентрация удобрений в почве значительно выше, чем в полевых условиях, дает заметное преимущество перед обычным равномерным распределением удобрений по всей почвенной массе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труды НИУ, вып. 94, 1933.
2. Rapport sur le fonctionnement de l'Institut des Recherches Agronomiques. Отчеты за 1925—1933 гг.
3. Bordas et Mathieu. — «Annales de la Science Agronom». N 6, 1929.
4. Waksmann S. H. Principles of soil Microbiology. 1927.
5. Турчин Ф. В. Превращение мочевины в почве. «Удобрение и урожай» № 6, 1931.
6. Gibson T. The Journal of Agricultural Science, v. XX, 1930.
7. Асланян Г. Ш. Мочевина и ее производные. Рукопись. Фонд НИУИФ.
8. Прянишников Д. Н. Статьи и научные работы. Юбилейный сборник НИУИФ, т. 2.
9. Turtschin Th. W. — «Ztschr. f. Pflanz. Düng. und Bodenkunde», T. A, Bd 35. H. 5—6, 1934.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БИКАРБОНАТА АММОНИЯ НА УДОБРЕНИЕ *

Бикарбонат аммония до последнего времени не использовали на удобрение в сколько-нибудь значительных количествах ни у нас в СССР, ни в зарубежных странах, что в значительной мере может быть объяснено нестойкостью этого продукта, его постепенным распадом при хранении по уравнению.:

$$NH_4HCO_3 \rightarrow NH_3 + H_2O + CO_2.$$

*. Статья опубликована в журнале «Земледелие» № 12, 1961.

На холоде и при отсутствии влаги в бикарбонате аммония процесс его распада протекает сравнительно медленно, при повышении температуры и некотором содержании влаги в продукте интенсивность распада значительно возрастает. Таким образом, при хранении имеют место потери бикарбоната аммония, размеры которых определяются температурой среды, влажностью продукта и продолжительностью его хранения.

В 1956 г. на Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ были проведены специальные опыты по изучению потерь при хранении на складе для удобрений крупных партий (от 500 до 700 кг) бикарбоната аммония, тарированного в обычные крафтцеллюлозные мешки. Опыты были заложены в мае, и начиная с этого времени периодически проводился учет потерь путем взвешивания всех хранившихся мешков с бикарбонатом аммония. В результате этих опытов было установлено, что совершенно сухой бикарбонат аммония, полученный по методу проф. И. П. Усюкина, с содержанием 17,7% азота в первые 20 дней хранения при сравнительно невысокой температуре воздуха подвергался распаду в весьма слабой степени, но позже, при наступлении более теплой погоды, интенсивность распада значительно возросла. Образовавшиеся при этом пары воды поглощались солью, что способствовало усилению процесса распада. Последний продолжался с высокой интенсивностью даже в осеннее время, когда температура воздуха резко упала. Бикарбонат аммония, полученный из Лисичанского химкомбината с исходной влажностью 2,5%, с первых же дней хранения интенсивно распадался (табл. 1).

Таблица 1

Среднесуточные потери бикарбоната аммония в отдельные периоды его хранения (%)

Период хранения	Средняя температура воздуха на складе за наблюдаемый период, °С	Бикарбонат аммония получен по И. П. Усюкину	Бикарбонат аммония получен из Лисичанского химкомбината
9/V—1/VI	9,3	0,012	—
1/VI—2/VII	18,1	0,08	0,27
2/VII—24/VII	14,0	0,15	0,27
24/VII—20/VIII	12,8	0,17	0,27
20/VIII—6/IX	12,2	0,12	0,26
6/IX—25/X	6,5	0,12	0,12

Общие потери бикарбоната аммония за весь период его хранения (около $5^1/_2$ месяцев) составили для сухого бикарбоната аммония 18,7, для влажного — 30%.

В 1956 г. проводился учет потерь бикарбоната аммония и в других пунктах СССР. Результаты наблюдений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Общие потери бикарбоната аммония при хранении в мешках на складе

Пункт хранения	Время хранения	В % от исходного веса
Колхоз „Красное солнце" Московской области	25/V—16/X	14
ЦОС ВИУА, Московской области	2/VII—13/XI	17,7
Всесоюзный институт свекловичного полеводства	31/V—11/X	24,3
Колхоз имени XIX партсъезда Ташкентской области	14/VII—19/XI	32,0

Существенным недостатком обычного бикарбоната аммония является и высокая дисперсность. Очень мелкие и легкие кристаллы этого продукта обладают крайне низкой сыпучестью, что чрезвычайно затрудняет и делает практически невозможным внесение его при помощи существующих туковых сеялок. Научными сотрудниками Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ испытывалась рассеваемость бикарбоната аммония в производственных условиях. В колхозе «Октябрь» Московской области опыты проводились с бикарбонатом аммония как в чистом виде, так и в смеси с фосфорными и калийными удобрениями. В результате этих опытов было установлено, что тракторная туковая сеялка даже при установке ее на предельно большую ширину высевающей щели не может обеспечивать среднюю норму внесения бикарбоната аммония (40 кг азота) как в чистом виде, так и в смеси с другими удобрениями. Чтобы высеять заданное количество бикарбоната аммония, потребовалось вторично пустить сеялку по тому же следу. Наблюдения за работой сеялки показали, что бикарбонат аммония, не обладая естественной сыпучестью, проталкивается через щель высевающего аппарата сеялки и распределяется по поверхности почвы отдельными пятнами, причем крайне неравномерно. Так как высота слоя удобрения при работе сеялки непрерывно уменьшается, то соответственно уменьшалось и количество выталкиваемого удобрения.

Рассеваемость бикарбоната аммония изучалась в колхозе «Память Ленина» Московской области. Вносили его здесь комбинированным подкормщиком-рыхлителем, снабженным банкой для удобрений. Была установлена полная невозможность внесения этой машиной бикарбоната аммония как в чистом виде, так и в смеси с гранулированным суперфосфатом и хлористым калием.

Эффективность бикарбоната аммония как азотного удобрения изучалась еще в старых опытах географической сети НИУИФ, проводившихся в 1928—1930 гг. В этих опытах испы-

тывались различные виды азотных удобрений на фоне суперфосфата и хлористого калия и на фоне томасшлака и хлористого калия. Азотные удобрения вносили из расчета 45 кг действующего вещества на гектар.

В таблице 3 приведены средние данные, полученные в опытах с сахарной свеклой на выщелоченных и деградированных черноземах и со льном, картофелем и овсом на почвах Нечерноземной зоны.

Таблица 3

Эффективность бикарбоната аммония в сравнении с другими азотными удобрениями

Культура	Фон	Число опытов	Прибавка урожая от азота, ц/га				
			натриевая селитра	сульфат аммония	аммиачная селитра	мочевина	бикарбонат аммония
Сахарная свекла	Суперфосфат + KCl	8	50	18	25	23	17
	Томасшлак + KCl	8	40	29	26	26	20
Картофель	Суперфосфат + KCl	11	61	58	59	49	48
	Томасшлак + KCl	11	52	58	53	54	49
Лен (соломка)	Суперфосфат + KCl	7	5,2	3,6	4,2	—	4,0
	Томасшлак + KCl	7	5,7	4,4	4,2	3,4	3,7
Овес (зерно)	Суперфосфат + KCl	6	7,5	6,1	—	6,1	4,8

В опытах с сахарной свеклой высокой эффективностью резко выделялась натриевая селитра, что объясняется положительным влиянием натрия — необходимого элемента пищи для этой культуры. Все остальные азотные удобрения по действию на урожай сахарной свеклы были близки между собой, за исключением бикарбоната аммония, эффективность которого в этих опытах характеризуется неустойчивостью. В опытах с картофелем, льном и овсом на дерново-подзолистых почвах при общей достаточно высокой эффективности азота не было обнаружено значительных различий в действии бикарбоната аммония, мочевины и аммиачной селитры, однако и здесь в большинстве случаев по бикарбонату аммония получены несколько худшие показания, чем по другим формам азотных удобрений.

В длительных полевых опытах на Люберецком опытном поле НИУИФ бикарбонат аммония, внесенный под культуры, не чувствительные к кислотности почв, — овес и картофель, давал такой же эффект как и аммиачная селитра, однако для чувствительных к кислотности почв капусты и брюквы бикарбонат аммония и мочевина значительно превосходили по своей эффективности аммиачную селитру и тем более сульфат аммония, которые в результате производимого ими подкисления почвы оказывали даже отрицательное действие (табл. 4).

Таблица 4

Эффективность бикарбоната аммония при длительном применении его на кислой подзолистой супесчаной почве

Культура	Год внесения удобрения	Прибавка урожая от внесения азотных удобрений, ц/га				
		натриевая селитра	сульфат аммония	аммиачная селитра	мочевина	бикарбонат аммония
Овес	Третий	12,4	8,3	10,8	11,6	10,0
Капуста	Первый и второй	159,0	62,0	92,0	100,0	93,0
Брюква	Седьмой	183,0	—46,0	—11,0	69,0	48,0

В первое время после внесения бикарбонат аммония, так же как и мочевина, которая в почве быстро превращается в бикарбонат аммония, производит подщелачивающее действие на почву, но с течением времени нитрифицируется, в результате чего кислотность почвы в конечном счете будет возрастать, поэтому при достаточно длительном применении на кислых малобуферных почвах эффективность его без внесения извести будет снижаться, хотя и не в такой мере, как при использовании аммиачной селитры, не говоря уже о сильнокислом удобрении — сульфате аммония. Поэтому на седьмой год внесения удобрений в опытах на Люберецком опытном поле эффективность бикарбоната аммония как биологически кислого удобрения была в 3—4 раза ниже в сравнении с физиологически щелочным удобрением — натриевой селитрой.

В связи с работами проф. И. П. Усюкина по усовершенствованию метода получения бикарбоната аммония в 1956 г. в географической сети и на опытных полях НИУИФ были проведены новые опыты по испытанию подсушенного мелкокристаллического бикарбоната аммония с содержанием 17,7% азота. Данные, полученные в опытах по географической сети, приведены в таблице 5.

Результаты опытов 1956 г. показывают, что действие бикарбоната аммония неустойчиво. Некоторая неустойчивость в его действии уже отмечалась нами при оценке результатов старых опытов географической сети НИУИФ. Возможно (и, повидимому, это наиболее вероятно), что проявлявшееся в отдельных опытах худшее действие бикарбоната аммония обусловлено запаздыванием с его заделкой. Теоретически можно считать, что даже нестойкий бикарбонат аммония, если его сразу после внесения заделать в почву, по эффективности не должен уступать аммиачной селитре. В этом случае он если и будет распадаться, то образующийся в процессе распада аммиак адсорбируется почвой и потерь его не произойдет. Но в практике применения удобрений нередки случаи, когда внесенные удобрения в течение некоторого времени остаются на по-

Таблица 5

Сравнительная эффективность бикарбоната аммония и аммиачной селитры

Место проведения опытов	Почва	Культура	Доза азота, кг/га	Урожай, ц/га		
				фон РК (контроль)	РК + бикарбонат аммония	РК + аммиачная селитра
Ак-Кавакская опытная станция СоюзНИХИ (Ташкентская область)	Серозем	Хлопчатник (хлопок-сырец)	150	26,3	37,9	38,1
Центральная станция удобрений СоюзНИХИ (Ташкентская область)	„	То же	100	—	42,3	42,1
Колхозы им. Буденного и „Искра" Черкасской области	„	Сахарная свекла	50	206	233	222
		То же	50	188	214	234
Колхоз им. Крупской Черкасской области	„	„ „	50	225	264	270
Всесоюзный научно-исследовательский институт льна (Калининская область)	Подзолистая суглинистая	Лен (соломка)	45	55,1	57,2	61,0
То же	То же	Лен (семена)	45	8,0	8,7	9,4
Центральная опытная станция ВИУА (Московская область)	„ „	Яровая пшеница (зерно)	45	19,2	25,6	27,9
То же	„ „	То же	45	19,2	22,3	24,3
„ „	„ „	„ „	45	19,2	22,6	25,6
Соликамская опытная станция (Пермская область)	„ „	Картофель	60	192	240	294

верхности почвы. При этом разрыв между временем внесения и заделкой удобрений может колебаться от 2—3 часов до нескольких дней.

Внесенный на поверхность почвы бикарбонат аммония разлагается во много раз быстрее, чем при хранении в мешках на складе, так как интенсивность распада находится в прямой зависимости от толщины слоя удобрения. Кроме того, гидротермические условия на поверхности почвы также способствуют распаду бикарбоната аммония. Учитывая эти соображения, на опытных полях НИУИФ были заложены опыты, в которых имелись варианты как с заделкой бикарбоната аммония в почву сразу же после внесения, так и с оставлением на поверхности почвы в течение определенного промежутка времени.

Данные полевых опытов с мелкокристаллическим бикарбонатом аммония приведены в таблице 6.

Таблица 6

Вариант опыта	Урожай, ц/га	
	картофеля	овса
Фон РК	94	11,9
РК + аммиачная селитра с немедленной заделкой	263	15,9
РК + бикарбонат аммония:		
с немедленной заделкой	232	19,6
без заделки в течение суток	—	8,7
без заделки в течение трех суток	225	9,4

Примечание. Опыты с картофелем проводились на Люберецком опытном поле, а с овсом — на Раменском опытном поле.

По аналогичной схеме были проведены и вегетационные опыты, в которых получены весьма четкие результаты, указывающие на исключительно большое значение своевременной заделки в почву бикарбоната аммония: при внесении РК урожай овса составил 15,9 г на сосуд, РК и аммиачной селитры, заделанной в почву через 5 дней — 55,9, при внесении РК и мелкокристаллического бикарбоната аммония, заделанного в почву, сразу же после внесения — 57, через день — 36,8 и спустя 3 дня — 30,6. Как видим, при немедленной заделке в почву бикарбонат аммония давал не меньший эффект, чем аммиачная селитра. Но если он оставался на поверхности почвы хотя бы сутки, эффективность его падала примерно на 40%.

Таким образом, в опытах обычный мелкокристаллический бикарбонат аммония при внесении вручную, когда удобрение равномерно распределялось по площади и сразу после внесения заделывалось в почву, не уступал по своей эффективности аммиачной селитре и мочевине. Однако вследствие распада при хранении и неустойчивости действия при запаздывании с заделкой в почву, а также в связи с крайне низкой сыпучестью, делающей часто невозможным механизированное внесение в почву, бикарбонат аммония не является перспективным удобрением и производство его для этих целей нецелесообразно.

Отмеченные недостатки могли бы быть в значительной мере устранены при производстве бикарбоната аммония в виде более крупных кристаллов. Так как процесс распада происходит на поверхности его частиц, то, естественно, резкое уменьшение удельной поверхности этой соли при выпуске ее в крупнокристаллическом виде должно сопровождаться значительным уменьшением интенсивности распада. С другой стороны, можно было ожидать, что крупные частицы будут обладать и более высокой естественной сыпучестью.

В лаборатории проф. И. П. Усюкина в течение 1956—1957 гг. был разработан метод получения крупнокристаллического бикарбоната аммония и изготовлены опытные партии этого удобрения с размером частиц 2—3 мм. Проведенные в этой лаборатории опыты с хранением крупнокристаллической соли бикарбоната аммония показали, что потери его при хранении в течение 220 дней сокращаются более чем в 1,5 раза в сравнении с мелкокристаллической солью.

Лабораторные испытания рассеваемости крупнокристаллического бикарбоната аммония на аппарате Пестова дали удовлетворительные результаты, поэтому потребовалось определить эффективность этого продукта. К сожалению, количество присланного удобрения было недостаточно для проведения опытов в достаточно широком масштабе, в связи с этим пришлось ограничиться закладкой одного полевого опыта на Долгопрудной агрохимической опытной станции и вегетационными опытами. В вегетационных опытах, кроме учета урожая, производился анализ растений на содержание азота, что дало возможность определить степень использования азота внесенных удобрений на построение урожая.

При оставлении на поверхности почвы в течение 5 часов потерь азота из обоих препаратов бикарбоната аммония не

Таблица 7

Эффективность крупнокристаллического и мелкокристаллического бикарбоната аммония

Условия проведения опыта	Урожай сухой массы овса, г/сосуд			Процент использования азота удобрений на урожай		
	крупнокристаллический бикарбонат аммония	мелкокристаллический бикарбонат аммония	аммиачная селитра	крупнокристаллический бикарбонат аммония	мелкокристаллический бикарбонат аммония	аммиачная селитра (содержание азота в урожае принято за 100%)
Внесенные азотные удобрения немедленно заделывались в почву	51,2	51,4	52,8	95	93	100
Заделка азотных удобрений производилась через 5 час.	49,2	52,2	52,8	98	91	100
Заделка азотных удобрений производилась через сутки	48,5	43,1	52,8	77	62	100
Заделка азотных удобрений производилась через 3 суток	37,8	39,2	52,6	49	50	100
Азотные удобрения вносились во влажную почву и заделывались через сутки	41,0	31,8	52,6	53	37	100
Азотные удобрения вносились поверхностно по всходам растений	32,2	29,0	46,2	47	44	100

Примечание. Урожай в контроле (РК) был равен 15,3 г.

наблюдалось. Эти потери были заметны при оставлении препаратов без заделки на сутки, причем они были значительно резче выражены для мелкокристаллического препарата. Размер потерь для незаделанного в почву бикарбоната аммония в сильной степени зависит от влажности почвы. При влажной почве потери резко возрастают. Эти опыты показали, что оба испытывавшихся препарата бикарбоната аммония непригодны для поверхностного внесения по всходам (табл. 7 и 8).

Таблица 8

Эффективность крупнокристаллического и мелкокристаллического бикарбоната аммония в полевых опытах на Долгопрудной агрохимической опытной станции

Вариант опыта	Урожай, ц/га	
	овса	картофеля
Фон РК	17,5	287
РК + аммиачная селитра под вспашку	24,7	344
РК + крупнокристаллический бикарбонат аммония под вспашку	25,3	342
РК + крупнокристаллический бикарбонат аммония, внесенный за 3 дня до вспашки	24,5	342
РК + мелкокристаллический бикарбонат аммония, внесенный за 3 дня до вспашки	—	304

Как видим, оставление крупнокристаллического бикарбоната аммония на поверхности почвы в течение трех дней не сказалось на его эффективности, однако в тех же условиях положительное действие мелкокристаллического бикарбоната аммония значительно снижалось.

Таким образом, если проблема хранения крупнокристаллического бикарбоната аммония в колхозах и совхозах будет решена достаточно удовлетворительно, т. е. чтобы потери его при хранении были совершенно исключены или сведены к предельному минимуму (не более 1—2%), и если заводской продукт* будет действительно обладать удовлетворительными физическими качествами, то может стоять вопрос о практическом использовании крупнокристаллического бикарбоната аммония для удобрения с тем, однако, ограничением, что он совершенно непригоден для использования в подкормку по всходам озимых. Но и при этих условиях производство крупнокристаллического бикарбоната аммония для удобрения целесообразно только в том случае, если оно будет сопряжено с какими-то существенными экономическими или техническими преимуществами в

* Такая оговорка необходима, потому что до сих пор испытывался крупнокристаллический бикарбонат аммония, специально изготовленный на опытной установке проф. И. П. Усюкина.

сравнении с производством аммиачной селитры или мочевины — удобрений, совершенно стабильных, пригодных для любых способов внесения и характеризующихся в 2—2,5 раза более высоким содержанием азота, чем бикарбонат аммония.

О ПРИМЕНЕНИИ МОЧЕВИНЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ *

Целесообразность широкого развития производства мочевины в химической промышленности СССР вызывается большим значением ее в сельском хозяйстве как высококонцентрированного безбалластного удобрения и возможностью использования ее в животноводстве в качестве заменителя азота белка в кормах крупного рогатого скота и овец. Но главным направлением в использовании мочевины в сельском хозяйстве будет применение ее на удобрение, поэтому потребность сельского хозяйства в мочевине как в удобрении в основном и будет определять возможные размеры ее производства.

Мочевина, содержание азота в которой составляет 46%, является более концентрированным удобрением и обладает значительно лучшими физико-механическими качествами, чем аммиачная селитра. Гранулированная мочевина практически не слеживается при транспорте и хранении, обладает хорошей рассеваемостью и вполне пригодна для механизированного внесения. Вследствие более высокой концентрации и лучших физико-механических свойств расходы на транспорт, хранение и внесение в почву мочевины значительно сокращаются в сравнении с аммиачной селитрой.

В почве мочевина очень быстро превращается в карбонат аммония. Это превращение происходит в результате воздействия уробактерий и некоторых других почвенных микроорганизмов, выделяющих фермент уреазу. Под влиянием этого фермента происходит гидролиз мочевины с образованием карбоната аммония:

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow (NH_4)_2CO_3.$$

Скорость гидролиза мочевины и соответственно превращения ее в карбонат аммония изучались в опытах лаборатории азота Научного института по удобрениям и инсектофунгицидам.

В этих опытах мочевина вносилась в почву из расчета 33 мг N на 1 кг почвы (100 кг N на 1 га), т. е. примерно в таких дозах, как это принято в практических условиях (табл. 1).

Таким образом, в подзолистой суглинистой почве и в черноземе за одни сутки мочевина полностью разложилась — ее азот перешел в аммонийную форму. Даже в песчаной почве,

* Статья написана в соавторстве с Б. Г. Блюм, И. Г. Кондратьевым, И. Л. Мокровой, Г. Г. Жидких и опубликована в журнале «Агрохимия» № 8, 1964.

Таблица 1

Скорость аммонификации мочевины в почве

Почвы	Внесено мочевины, мг N	Найдено в почве через 24 часа, мг N	
		азот мочевины	азот аммонийный
Подзолистая суглинистая	33	0	34,25
Мощный чернозем	33	0	31,80
Подзолистая песчаная	33	10,9	19,55

характеризующейся сравнительно бедной микрофлорой, за этот период примерно 60% внесенного количества мочевины перешло в карбонат аммония. Следовательно, с чисто агрохимической точки зрения мочевину можно рассматривать как своего рода стабильную форму карбоната аммония.

В результате образования карбоната аммония в первое время после внесения мочевины реакция почвы смещается в щелочную сторону, и это в известных случаях может оказывать положительное влияние на легких малобуферных песчаных почвах. Образовавшийся из мочевины аммонийный азот постепенно нитрифицируется.

Уже в первые 3—4 недели после внесения мочевины в почву большая часть ее нитрифицируется (табл. 2).

Таблица 2

Степень нитрификации азота мочевины на различных типах почв

Почва	Внесено мочевины в почву, мг N на 1 кг	Найдено в почве нитратного азота через 20 дней, мг
Подзолистая суглинистая	150	127
» »	0 (контроль)	44
Мощный чернозем	150	143
» »	0 (контроль)	40
Карбонатный серозем	150	104
» »	0 (контроль)	45

По мере нитрификации мочевины реакция почвы подкисляется, и в конечном итоге мочевина, как и аммиачная селитра, является биологически кислым удобрением.

Изучение мочевины как азотного удобрения впервые в СССР было начато в 1928—1930 гг. в полевых опытах географической сети Научного института по удобрениям и инсектофунгицидам. Действие мочевины и сравниваемых с ней других форм азотных удобрений в этих опытах изучалось на двух

калийно-фосфорных фонах — кислом, включающем суперфосфат и 40%-ную калийную соль, и щелочном — томасшлак и 40%-ная калийная соль. Доза азота во всех опытах и под все культуры была установлена 45 кг N на 1 га.

Эти опыты показали, что действие мочевины на урожай различных сельскохозяйственных культур на всех почвах, которые были представлены в этих опытах, примерно такое же, как и действие аммиачной селитры (табл. 3). Если прибавку от азота аммиачной селитры принять за 100, то в среднем из 161 опыта прибавка от мочевины составляла 93,1.

Таблица 3

Эффективность мочевины и аммиачной селитры в опытах географической сети (1928—1930 гг.)

Почвы и сельскохозяйственные культуры	Число опытов	Урожай по фону РК, ц/га	Прибавки урожая от азота, ц/га		Понижение (—) или повышение (+) прибавки урожая от мочевины в сравнении с аммиачной селитрой, %. Прибавка от $NH_4NO_3 = 100\%$
			аммиачная селитра	мочевина	
Подзолистые почвы:					
картофель	24	136	56	50	—11
лен-соломка	36	19,9	5,1	4,5	—11
лен-семена	36	5,0	1,3	1,3	0
овес	8	18,1	8,8	9,2	+5
Серые почвы лесостепи — сахарная свекла	10	173	44	49	+11
Черноземные почвы — сахарная свекла	47	212	51	44	—13
Всего . . .	161				—6,9

Новые опыты по изучению мочевины в географической сети в условиях различных почв СССР под разные сельскохозяйственные культуры были проведены в 1958—1963 гг.

Результаты опытов приведены в таблице 4.

Как следует из этих данных, единица азота в мочевине в среднем дает такой же эффект, как и единица азота в аммиачной селитре. В ряде опытов действие мочевины было выше, чем аммиачной селитры, однако ввиду сравнительно малого числа опытов воспроизводимость их результатов недостаточно ясна.

Однако принципиальная возможность более высокой эффективности мочевины для некоторых условий не исключена. При внесении мочевины в почву осмотическое давление почвенного раствора в первое время практически не повышается вследствие быстрого превращения мочевины в адсорбируемую

Таблица 4

Эффективность мочевины и аммиачной селитры в опытах географической сети (1958—1963 гг.)

Сельскохозяйственные культуры	Число опытов	Урожай по фону РК, ц/га	Прибавки урожая от азота, ц/га		Понижение (—) или повышение (+) прибавки от мочевины в сравнении с аммиачной селитрой, %
			аммиачная селитра	мочевина	
А. Подзолистые почвы					
Картофель	17	162	33	42	+23
Зерновые	4	22,1	3,27	2,6	—18
Лен-соломка	4	48,0	7,5	7,0	—7
Лен-семена	4	5,2	0,6	0,7	+16
Рис	4	40	9,0*	9,9	+10
Луга (сухое сено)	4	43	14,3	12,9	—11
Сахарная свекла	1	200	80	92	+13
Б. Серые почвы лесостепи и чернозем					
Озимая пшеница	5	25,0	4,7	4,7	+0
Кукуруза (зерно)	3	24,5	4,8	6,9	+43
Сахарная свекла	12	315	25	28	+11
Конопля	7	29,1	19,9	17,4	—12
В. Каштановые почвы, сероземы и почвы субтропиков					
Озимая пшеница	2	13,3	6,5	8,4	+29
Кукуруза	1	23,7	1,8	3,9	+117
Хлопчатник (хлопок-сырье)	1	33,4	3,3	5,7	+78
То же	2	35,5	8,3	9,6	+16
„ „	2	19,2	9,6	11,9	+23
„ „	6	—	33,3**	36,5**	+10
Сахарная свекла	7	542	70	72	+3
Чай	14	—	52**	51,5**	-1
Чай	14	—	65,1**	65,4**	+0
Рис	2	23,5	12,4	11,0*	—12
	116				+7,9

* Вместо аммиачной селитры в опытах с рисом использовался сульфат аммония.

** Абсолютный урожай по NPK.

почвой аммиачную форму. Это может обусловливать известное преимущество мочевины перед аммиачной селитрой для таких растений, как кукуруза, хлопчатник, некоторые овощные культуры, которые на первых стадиях своего развития чувствительны к повышению осмотического давления почвенного раствора, создаваемого внесением аммиачной селитры.

Как показывают приведенные в таблице 4 данные, мочевина может быть весьма эффективно использована также и

под рис, где аммиачную селитру опасаются применять из-за риска вымывания подвижного нитратного азота в условиях затопления.

Изучение эффективности мочевины проводилось также и в многолетних полевых опытах на Долгопрудном и Люберецком опытных полях НИУИФ. На дерново-подзолистой суглинистой почве Долгопрудного опытного поля мочевина, так же как и в опытах географической сети, оказывала на урожай отдельных сельскохозяйственных культур примерно такое же действие, как и аммиачная селитра. Так, прибавки в урожае зерна овса от 45 кг азота в виде мочевины или аммиачной селитры в среднем за 5 лет (1942—1946) были соответственно равны 12,3 и 12,1 ц/га. Прибавки в урожае картофеля от той же дозы азота за указанный период соответственно составили 67 (мочевина) и 51 ц/га (аммиачная селитра).

В многолетних опытах на легкой оподзоленной супеси Люберецкого опытного поля действие мочевины и других форм азотных удобрений в период 1942—1961 гг. изучалось на фоне без извести и на фоне извести, внесенной из расчета на нейтрализацию обменной кислотности почвы. В связи с тем что на этой почве выявилась резкая потребность растений в магнии, действие азотных удобрений на обоих указанных фонах изучалось как при сопутствующем внесении магния в виде сульфата калия-магния, так и без внесения магния. В опытах были приняты такие дозы азота (кг/га): под картофель — 60, кормовую свеклу — 90 и овес — 45 (табл. 5).

Таблица 5

Сравнительная эффективность мочевины и аммиачной селитры в многолетних полевых опытах на легкой оподзоленной супесчаной почве Люберецкого опытного поля НИУИФ (1942—1961 гг.)

Культуры	Дополнительные удобрения	Без извести			По фону извести		
		урожай по фону P_2K, ц/га	прибавки от азота, ц/га		урожай по фону P_2K, ц/га	прибавки от азота, ц/га	
			аммиачная селитра	мочевина		аммиачная селитра	мочевина
Картофель, среднее за 12 лет		106	40	64	126	43	54
Картофель, среднее за 7 лет	Mg	147	85	107	158	76	88
Свекла, среднее за 12 лет		126	10	59	133	21	49
Свекла, среднее за 7 лет	Mg	146	36	83	193	75	119
Овес, среднее за 12 лет		7,5	6,7	6,3	7,2	9,4	8,6
Овес, среднее за 7 лет	Mg	9,6	11,5	11,5	10,2	9,0	8,9

В условиях этого опыта на легкой супесчаной почве мочевина оказывала на урожай овса такой же эффект, как и аммиачная селитра. Но для картофеля и свеклы мочевина была

более эффективным источником азота, чем аммиачная селитра. Преимущество мочевины особенно заметно было на неизвесткованных фонах. Как уже говорилось, мочевина в первое время после внесения вследствие превращения ее в карбонат аммония смещает реакцию почвы в щелочную сторону. Это имеет существенное значение на легких песчаных или супесчаных почвах, характеризующихся крайне слабой буферностью. А так как растения особенно чувствительны к изменению реакции почвы именно на первых стадиях их развития, то отсюда становится понятным и более высокое действие мочевины на картофель и свеклу на неизвесткованном фоне. Но и на известкованном фоне, когда реакция удобрения не имела значения для его эффективности, мочевина все же давала несколько лучший эффект, чем аммиачная селитра. Возможно, это связано с тем, что мочевина является осмотически неактивным удобрением, т. е. ее внесение не увеличивает осмотическое давление почвенного раствора, что в условиях малобуферных песчаных почв имеет большее значение, чем на суглинистых почвах, обладающих более высокой буферностью.

Таким образом, для отдельных культур, возделываемых на легких песчаных и супесчаных почвах, мочевина является лучшим источником азота, чем аммиачная селитра. Для оценки этого факта следует иметь в виду, что песчаные и легкие супесчаные почвы весьма распространены в центральных, западных и северо-восточных районах СССР и что общая посевная площадь, занятая этими почвами в указанных районах, достигает 13 млн. га.

При изготовлении гранулированной мочевины в результате местного перегрева расплавленной мочевины может происходить образование биурета:

$$\underset{\text{мочевина}}{NH_2CONH_2} + \underset{\text{мочевина}}{NH_2CO \cdot NH_2} \rightarrow \underset{\text{биурет}}{NH_2CONH \cdot CO \cdot NH_2} + \underset{\text{аммиак}}{NH_3}.$$

Наличие биурета в мочевине сверх известного предела моможет оказывать токсическое влияние на растения, особенно на молодые ростки. В последние годы было проведено сравнительно много работ по выяснению степени токсичности биурета в различных условиях. Оказалось, что величина концентрации биурета, при которой проявляется его токсический эффект, колеблется в достаточно широких пределах в зависимости от вида растений. Так, при применении мочевины для внекорневой подкормки цитрусовых и некоторых других субтропических и тропических культур, содержание биурета в мочевине сверх 1,5% может оказаться вредным [1, 2]. С другой стороны, при обычном внесении в почву мочевины с содержанием биурета в 10% никакого отрицательного влияния последнего не было обнаружено в опытах с хлопчатником, овсом и томатами [3—5]. На основании данных опытов, проведенных

в Англии, пришли к заключению, что наличие в мочевине биурета до 2,5% не оказывает влияния на ее эффективность при использовании ее под полевые культуры.

В вегетационных опытах, проведенных в нашей лаборатории, испытывались образцы мочевины с содержанием биурета от 0,09 до 9,10%. Опыты проводились на известкованной подзолистой суглинистой почве Долгопрудной агрохимической опытной станции с кукурузой, сахарной свеклой, картофелем и яровой пшеницей. Мочевина вносилась в высоких дозах: из расчета 1,5 г N на сосуд с 6 кг почвы (что соответствует 450 кг N на 1 га) в опытах с кукурузой и сахарной свеклой, 3,0 г N в опытах с картофелем и 0,6 г в опыте с пшеницей. P_2O_5 и K_2O вносились в таких же дозах, как и азот. Мочевина, фосфорные и калийные удобрения равномерно распределялись в почве путем перемешивания удобрений со всей массой почвы.

Результаты опытов сведены в таблице 6.

Таблица 6

Влияние биурета на эффективность мочевины (вегетационные опыты на известкованной дерново-подзолистой суглинистой почве). Урожай, г/сосуд

Содержание биурета в мочевине, %	Кукуруза (сухое вещество)	Сахарная свекла		Картофель (клубни)	Яровая пшеница (зерно)
		корни	листья (сухое вещество)		
0,09	57,2	98	24,6	448	14,4
0,59	62,0	98	30,6	468	14,9
1,15	71,0	108	99,7	444	13,2
2,70	64,9	106	29,5	436	12,4
5,30	53,1	84	27,6	387	12,9
7,78	1,6	59	24,0	309	12,8
9,10	0,8	54	18,5	297	12,8
Фон РК без азота	6,8	14	3,4	99	3,1

Как следует из результатов этих опытов, наличие примеси биурета в мочевине до 2,7% ни в одном случае не оказывало сколько-нибудь заметного отрицательного влияния. Но при содержании в мочевине 5,3% биурета вредное влияние его отчетливо проявилось на кукурузе, сахарной свекле и картофеле.

Дальнейшее увеличение содержания биурета в мочевине вызывало сильное повреждение этих растений. Особенно чувствительна к высоким концентрациям биурета кукуруза. Уже при содержании 5,3% биурета в мочевине листья кукурузы скручивались в трубочку и между жилками листьев появлялись хлоротичные желтые пятна, а края листьев растрескивались.

При содержании биурета в мочевине в 7,78 и 9,10% растения кукурузы вскоре после появления всходов прекратили свой рост и почти полностью погибли. Наиболее устойчивой к биу-

рету оказалась яровая пшеница, для которой мочевина с самым высоким содержанием биурета (9,10%) была столь же эффективна, как и мочевина с предельно низким содержанием биурета (0,09%), которую можно рассматривать как практически не содержащую биурет. Наиболее чувствительны к биурету молодые проростки растений. Поэтому при заделке мочевины с повышенным содержанием биурета в более глубокие слои почвы, когда исключен контакт его с прорастающими семенами, отрицательное влияние биурета, даже на таком чувствительном растении, как кукуруза, сказалось лишь в весьма слабой степени. Это видно из результатов опыта, в котором изучались разные способы внесения мочевины (табл. 7).

Таблица 7

Влияние способов внесения мочевины на токсичность биурета

Содержание биурета в мочевине, %	Сухой вес зеленой массы кукурузы (относительные величины)			
	внесение перед посевом при равномерном распределении мочевины в почве	заделка в почву в слой на глубине 15 см	внесение в почву за 3 недели до посева	внесение в подкормку в фазу формирования 4-го листа у кукурузы
0,09	100	100	100	100
2,70	111	93	97	100
5,30	93	84	109	79
7,78	20	88	97	64

Равным образом и при внесении мочевины с высоким содержанием биурета за 3 недели до посева вредное влияние его совершенно не сказалось на кукурузе. Это связано со сравнительно быстрым разложением биурета в почве, его аммонификацией. Основное и практически наиболее важное положение, вытекающее из этих опытов, сводится к тому, что наличие в мочевине до 2,7% биурета не оказывает токсического влияния на растения при обычно применяемых в практике условиях использования удобрений.

Если учесть, что при современной технике производства гранулированной мочевины содержание в ней биурета не превышает 1,5%, то становится очевидным, что проблема биурета в настоящее время вряд ли может беспокоить сельское хозяйство.

В зарубежной литературе, главным образом в английских источниках, иногда высказываются опасения, что применение мочевины в ряде случаев может давать худший эффект в сравнении с другими формами азотных удобрений. В качестве оснований для таких опасений обычно ссылаются на данные отдельных лабораторных опытов, в которых при поверхност-

ном внесении больших доз мочевины происходят частичные потери азота в результате улетучивания аммиака, образующегося при распаде карбоната аммония, в который превращается мочевина в почве.

Вместе с тем указывается, что образование из мочевины карбоната аммония, легко отщепляющего аммиак, повышает парциональное давление паров аммиака в почве и при контакте его с прорастающими семенами могут происходить повреждения ростков и соответственно изреживание всходов.

Что касается возможных потерь азота при поверхностном внесении мочевины, то в опытах отдельных авторов размер таких потерь варьировал от нуля до 15—20%. В опытах, проведенных в Ротамстеде, потери азота в результате улетучивания аммиака колебались от 2 до 13% от внесенной дозы мочевины [6].

Наибольший размер потерь падал в этих опытах на песчаные почвы и на карбонатные почвы. Но по данным того же автора, на карбонатных почвах происходят не меньшие потери азота в виде аммиака и при применении такого удобрения, как сульфат аммония.

В опытах Larsen и Gunary были обнаружены значительные потери азота вследствие улетучивания аммиака из сульфата аммония, аммиачной селитры и фосфатов аммония при поверхностном внесении этих удобрений на карбонатных почвах [7].

Таким образом, при некоторых условиях, по-видимому, могут происходить потери азота из мочевины, но никакие другие формы азотных удобрений не застрахованы от потерь азота при их превращении в почве.

В настоящее время имеется достаточно экспериментальных данных, полученных как у нас, так и в зарубежных лабораториях, указывающих на значительные потери азота из любых видов азотных удобрений. Поэтому для сравнительной оценки мочевины представляется весьма важным установить, в какой мере суммарные потери азота, происходящие при том или ином способе применения мочевины, сопоставимы с суммарными потерями азота из других форм азотных удобрений.

Для того чтобы получить ответ на этот вопрос, необходимо располагать точными данными об использовании азота мочевины и сравниваемых с ней других азотных удобрений растениями и о количестве оставшегося азота в почве после уборки урожая.

Именно с этой целью нами в 1963 г. были проведены вегетационные опыты, в которых сравнивались мочевина и аммиачная селитра при различных способах их внесения в условиях разных почв. Все испытывавшиеся в этих опытах азотные удобрения были мечены изотопом N^{15}, так как только применение изотопной техники позволяет получить точную инфор-

мацию о степени использования растениями азота удобрений и о дальнейшей судьбе его в почве. Опыты проводились на следующих почвенных разностях: 1) подзолистая суглинистая почва Долгопрудной агрохимической опытной станции, pH водной суспензии 5,2; 2) чернозем Граковского опытного поля НИУИФ, pH водной суспензии 7,0; 3) легкая супесчаная почва Люберецкого опытного поля, pH водной суспензии 5,8; 4) карбонатный серозем из Средней Азии, pH водной суспензии 7,7.

В качестве подопытных растений на подзолистой суглинистой и на супесчаной почве был взят овес, на черноземе и сероземе — яровая пшеница.

На всех почвах сравниваемые формы азотных удобрений были мечены изотопом N^{15}.

Обогащение изотопом N^{15} для мочевины было равным 9,45 атом % избытка N^{15}, для аммиачной селитры — 9,65 атом % избытка N^{15} в группе NH_4 и 10,23 атом % избытка N^{15} в группе NO_3. Доза азота во всех опытах была установлена 0,3 г на сосуд с 4 кг почвы, и с этой дозой азота в соответствии с указанным обогащением изотопом N^{15} для отдельных видов удобрений вносился такой избыток атомов N^{15}: мочевина — 28,37 мг N^{15}, NH_4NO_3 — 29,80 мг N^{15}.

Дозы P_2O_5 и K_2O во всех вариантах опыта были по 0,5 г на сосуд. Так как потери азота из мочевины в значительной мере могли изменяться в зависимости от способа ее внесения, и прежде всего от степени контакта частиц удобрения с атмосферой, когда представляются наибольшие возможности для улетучивания образовавшегося из мочевины аммиака, при построении схемы опыта были предусмотрены следующие варианты: а) поверхностное внесение азотных удобрений по всходам без последующей заделки удобрений, б) внесение азотных удобрений на поверхность почвы за 5 дней до посева без последующей заделки удобрений, в) внесение азотных удобрений с мелкой заделкой их в поверхностный 3-сантиметровый слой почвы и г) равномерное распределение азотных удобрени по всему сосуду.

Варианты «а», «в» и «г» моделируют основные приемы внесения азотных удобрений в практических условиях сельского хозяйства; в варианте «б» создаются более утрированные условия, при которых можно было ожидать особенно больших потерь азота вследствие улетучивания аммиака. Было намечено, что после созревания растений и учета урожая подопытные растения, включая всю надземную их массу (зерно, солома, полова, пожнивные остатки и корни), а также почва будут подвергнуты анализу на содержание азота и его изотопный состав, с тем чтобы установить точный баланс атомов N^{15} и соответственно всего азота во всех вариантах опыта. Однако ко времени представления настоящей работы химические и изотопные анализы закончены только для опытов на подзоли-

стой суглинистой почве и на черноземе. Для опытов на супесчаной почве и на сероземе пока что имеются только данные урожайности, но поскольку эти данные также представляют интерес для оценки мочевины, то они тоже включены в работу.

Данные по урожайности, выносу азота урожаем и учету количества общего азота в почве после уборки урожая в опытах на подзолистой суглинистой почве и на черноземе приведены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8

Действие мочевины и аммиачной селитры на урожай овса при различных способах внесения этих удобрений (вегетационные опыты)
Дерново-подзолистая суглинистая почва, pH водн. 5,2

Способ внесения азотных удобрений	Азотное удобрение	Урожай, г/сосуд. Среднее из трех сосудов		Общий вынос азота растениями, мг/сосуд	Содержание азота в почве, мг/сосуд
		зерно	солома и корни		
Фон PK без азота	—	3,5	6,9	72	4624
Поверхностно по всходам	Мочевина	13,0	15,6	288	4641
Поверхностно по всходам	Аммиачная селитра	13,1	16,3	285	4573
Поверхностно за 5 дней до посева	Мочевина	12,3	15,2	303	4624
То же	Аммиачная селитра	12,2	14,2	305	4590
В верхний 3-сантиметровый слой почвы	Мочевина	12,6	14,9	311	4658
То же	Аммиачная селитра	12,5	15,0	284	4590
Равномерно по всему сосуду	То же	12,5	15,2	316	4760
То же	Мочевина	12,9	15,8	296	5032

Данные по урожайности в опытах на супесчаной почве и на карбонатном сероземе приведены в таблице 10.

Урожай зерна и соломы и общий вынос азота растениями на черноземе по мочевине (табл. 9) был несколько выше, чем по аммиачной селитре во всех вариантах опыта. Что особенно удивляет, так это то, что наибольшая разница в пользу мочевины была в том случае, когда азотные удобрения вносились поверхностно по входам, т. е. когда условия для потерь азота из мочевины, если бы они могли быть, более благоприятны, чем при равномерном распределении мочевины в почве, имея в виду, что реакция почвы близка к щелочному интервалу.

Урожай растений и вынос ими азота на подзолистой суглинистой почве (табл. 8) по мочевине и аммиачной селитре по всем вариантам опыта примерно одинаковы.

В опытах на легкой супесчаной почве, характеризующейся крайне низкой обеспеченностью собственными запасами усвояемого азота, действие мочевины и аммиачной селитры было

Таблица 9

Действие мочевины и аммиачной селитры на урожай (пшеница) при различных способах внесения этих удобрений (вегетационные опыты)
Чернозем, pH водн. 7,0

Способ внесения азотных удобрений	Азотное удобрение	Урожай, г/сосуд. Среднее из трех сосудов		Общий вынос азота растениями, мг/сосуд	Содержание азота в почве, мг/сосуд
		зерно	солома и корни		
Фон РК без азота	—	7,6	13,3	181	9540
Поверхностно по всходам	Мочевина	14,6	20,6	308	9840
То же	Аммиачная селитра	11,5	17,4	289	9720
Поверхностно за 5 дней до посева	Мочевина	14,8	20,2	334	9660
То же	Аммиачная селитра	13,2	18,4	342	9060
В верхний 3-сантиметровый слой почвы	Мочевина	15,0	19,7	385	9390
То же	Аммиачная селитра	14,3	19,7	355	9660
Равномерно по всему сосуду	Мочевина	15,9	21,8	375	9960
То же	Аммиачная селитра	13,0	19,8	355	9480

Таблица 10

Действие мочевины и аммиачной селитры на урожай при различных способах внесения этих удобрений

Способ внесения азотных удобрений	Азотное удобрение	Дерново-подзолистая супесчаная почва. Овес, pH водн. 5,8		Серозем. Пшеница, pH водн. 7,7	
		зерно	солома и корни	зерно	солома и корни
Фон РК без азота	—	2,2	10,3	6,1	12,0
Поверхность по всходам	Мочевина	12,0	16,8	8,3	12,3
То же	Аммиачная селитра	11,2	17,6	10,4	14,6
Поверхностно за 5 дней до посева	Мочевина	12,4	16,2	8,3	11,5
То же	Аммиачная селитра	11,9	18,0	9,5	13,5
В верхний 3-сантиметровый слой почвы	Мочевина	11,9	17,6	8,5	12,6
То же	Аммиачная селитра	11,9	17,6	8,9	12,8
Равномерно по всему сосуду	Мочевина	11,8	16,8	8,1	12,6
То же	Аммиачная селитра	11,3	17,5	9,4	13,4

в равной степени одинаковым и высоким при всех способах внесения этих удобрений. В опытах на сероземе, по-видимому вследствие засоленности взятого образца почвы, условия для роста растений оказались неблагоприятными, поэтому и по

мочевине и по аммиачной селитре в равной мере были получены низкие урожаи пшеницы.

Таким образом, в этих опытах мочевина при всех способах ее внесения давала во всяком случае не худший эффект, чем аммиачная селитра, если даже не говорить о несколько лучшем ее действии на черноземе. Равным образом и общий вынос растениями азота при внесении мочевины был такой же или даже несколько выше по сравнению с аммиачной селитрой.

Но данные по выносу общего азота недостаточны для оценки фактического использования растениями азота сравниваемых удобрений, так как растения берут азот не только из удобрений, но и из почвы. Поэтому только применение изотопной техники в таких опытах позволяет точно установить как действительные размеры использованного растениями азота из внесенных удобрений, так и количество азота, оставшегося в виде тех или других его соединений в почве после снятия урожая. Такие данные, полученные в опытах на подзолистой суглинистой почве и на черноземе, приведены в таблицах 11 и 12.

Таблица 11

Баланс азота в опытах с мочевиной и аммиачной селитрой, меченными по N^{15}
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва, pH водн. 5,2

Способ внесения азотных удобрений	Азотное удобрение	Атом% избытка N^{15}		Использовано растениями азота из внесенного удобрения, %	Осталось в почве азота из внесенного удобрения, %	Потери азота из удобрений, %
		азот растений (зерно, солома, корни)	азот почвы			
Поверхностно по всходам	$CO(NH_2)_2$	5,33	0,1423	54,3	23,3	22,4
То же	NH_4NO_3	5,95	0,1021	57,0	15,7	27,3
Поверхностно за 5 дней до посева	$CO(NH_2)_2$	5,26	0,1243	56,1	20,2	23,7
То же	NH_4NO_3	6,54	0,1133	65,8	17,4	16,8
В верхний 3-сантиметровый слой почвы	$CO(NH_2)_2$	5,44	0,1497	59,8	24,6	15,6
То же	NH_4NO_3	5,66	0,1060	53,9	16,3	29,8
Равномерно по всему сосуду	$CO(NH_2)_2$	5,04	0,1462	51,1	26,0	22,9
То же	NH_4NO_3	5,50	0,1352	58,2	21,6	20,2

Данные, полученные с применением изотопного метода, показывают, что растениями фактически было использовано из внесенных удобрений в опытах на подзолистой почве в среднем из всех вариантов 57% азота, а в опытах на черноземе около 48%.

Колебания в степени использования азота удобрений растениями на подзолистой суглинистой почве были относительно

Таблица 12

Баланс азота в опытах с мочевиной и аммиачной селитрой, меченными по N^{15}
Чернозем, pH водн. 6,8

Способ внесения азотных удобрений	Азотное удобрение	Атом% избытка N^{15}		Использовано растениями азота из внесенного удобрения, %	Осталось в почве азота внесенного удобрения, %	Потери азота удобрения, %
		азот растений (зерно, солома, корни)	азот почвы			
Поверхностно по всходам	$CO(NH_2)_2$	3,63	0,0765	39,9	26,5	33,6
То же	NH_4NO_3	4,28	0,0510	41,6	16,5	41,9
Поверхностно за 5 дней до посева	$CO(NH_2)_2$	3,71	0,0693	43,7	23,6	32,7
То же	NH_4NO_3	4,47	0,0602	51,2	18,3	30,5
В верхний 3-сантиметровый слой почвы	$CO(NH_2)_2$	3,91	0,0950	53,0	31,5	15,5
То же	NH_4NO_3	4,48	0,0693	53,5	22,4	24,1
Равномерно по всему сосуду	$CO(NH_2)_2$	3,69	0,0840	48,9	29,4	21,7
То же	NH_4NO_3	4,30	0,0915	52,0	29,2	18,8

небольшими и не носили закономерного характера. Обычно при меньшем выносе азота растениями в почве оставалось несколько больше азота. Общие потери азота из удобрений при внесении мочевины на этой почве колебались по отдельным вариантам от 15,6 до 23,7%. Потери же азота при внесении аммиачной селитры были несколько большими и составляли от 16,8 до 29,8%. При этом во всех вариантах, т. е. при любом способе внесения удобрений, потерь азота из мочевины было меньше, чем из аммиачной селитры.

В опытах на черноземе потери азота из удобрений достигли наибольшего размера при поверхностном внесении азотных удобрений по всходам и при внесении удобрений за 5 дней до посева на голую почву, без заделки. В этом случае потери азота мочевины были примерно такими, как и для аммиачной селитры или даже меньшими. По-видимому, в условиях щелочной реакции почвы могут происходить потери азота путем улетучивания аммиака, но не меньше шансов за то, что такие же или даже большие потери азота будут происходить и при внесении аммиачной селитры или какого-либо другого аммиачного удобрения, что вполне понятно, так как в условиях щелочной среды аммиак неизбежно будет выделяться из любых его солей. Но потери азота из удобрений обусловлены не только выделением аммиака в атмосферу. Главные и основные потери азота происходят в результате денитрификации — процесса, вызываемого жизнедеятельностью определен-

ных групп почвенных микроорганизмов, использующих кислород нитратов в процессе дыхания.

Потери азота из внесенных удобрений в результате денитрификации происходят во всех почвах и при любом способе внесения удобрения. При этом установлено, что при использовании нитратных форм азотных удобрений эти потери, как правило, значительно выше, чем при использовании аммиачных удобрений или мочевины [8]. Это связано с тем, что нитратный азот сразу же подвергается в почве атаке денитрифицирующих микроорганизмов, в то время как аммиачный азот, прежде чем подвергнуться воздействию этих микроорганизмов, должен предварительно окислиться в почве, что требует известного времени.

Именно по этой причине в рассматриваемых здесь опытах потери азота из аммиачной селитры, в составе которой половина азота представлена нитратной формой, особенно на подзолистой суглинистой почве были значительно выше, чем при внесении мочевины. Таким образом, в качестве общего заключения из этих опытов следует, что при любом способе внесения мочевины, который может применяться в практических условиях, нет никаких оснований опасаться повышенных потерь азота и худшего эффекта от применения мочевины в сравнении с аммиачной селитрой. Наоборот, в ряде случаев при применении мочевины можно рассчитывать на то, что общие потери азота из удобрений будут меньшими, чем при применении аммиачной селитры.

Следует сказать, что, несмотря на высказываемые отдельными авторами соображения относительно возможных потерь азота в виде аммиака при внесении мочевины и о токсическом эффекте аммиака на всходы, при непосредственном контакте мочевины с прорастающими семенами трудно найти совершенно безупречные данные полевых опытов, которые бы могли дискриминировать мочевину как удобрение.

Можно создать искусственные, крайне утрированные условия, при которых могут проявиться отрицательные моменты в действии мочевины, обусловленные превращением ее в почве в карбонат аммония. Если, например, внести мочевину и высеваемые семена в одно и то же гнездо в почве так, чтобы удобрение и прорастающие семена находились в тесном контакте, то с уверенностью можно ожидать значительного изреживания всходов.

Такие опыты были проведены в свое время и в нашей лаборатории и воспроизведены в других странах. Но в практических условиях случаи такого позиционного размещения удобрения относительно семян немыслимы и всегда между высеваемыми семенами и удобрением будет находиться какая-то прослойка почвы, даже при комбинированном внесении через один сошник и семян и удобрения.

В качестве иллюстрации можно привести данные опытов, проведенных в Ротамстеде (Англии) (табл. 13).

Таблица 13

Сравнительная эффективность мочевины и сульфата аммония при разных способах внесения азотных удобрений под ячмень [9]. Средние из 16 опытов. Урожай по фону РК (без азота) 24,3 ц/га

Способы внесения азотных удобрений	Прибавки урожая зерна от азота, ц/га			
	доза 44 кг/га		доза 88 кг/га	
	сульфат аммония	мочевина	сульфат аммония	мочевина
Сплошное разбросное	7,6	8,2	12,8	13,7
Комбинированной сеялкой в рядки	10,0	10,2	14,3	12,6
Местное на 2,5 см в сторону от рядка	9,9	9,8	13,5	14,6

Как видно из этих данных, во всех случаях — при разбросном, при комбинированном и при местном внесении мочевины в сторону от рядка — эффективность мочевины была не ниже сравниваемого с ней сульфата аммония.

В опытах этих же авторов, проведенных на карбонатных почвах, сравнивались все упомянутые способы внесения при использовании в качестве азотных удобрений мочевины, сульфата аммония, нитрата кальция и нитрата натрия. Оказалось, что в среднем из 10 опытов при комбинированном и при местном внесении азотных удобрений в сторону от рядка на 2,4 см мочевина, сульфат аммония и нитрат кальция действовали примерно одинаково, а при разбросном внесении мочевина и нитрат кальция давали несколько большую прибавку урожая, чем сульфат аммония.

В опытах на Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ в 1963 г. изучалось в модельных вегетационных опытах сравнительное действие мочевины и аммиачной селитры при равномерном распределении удобрений по всей массе почвы и при местном внесении, в различном положении удобрений относительно семян (табл. 14).

При всех способах размещения мочевины не наблюдалось изреживания всходов и не было понижения ее эффективности в сравнении с аммиачной селитрой. Как уже говорилось, потери аммиака при внесении мочевины могли бы в наибольшей мере проявиться при поверхностном ее внесении. Но если эти потери имеют место, то они в равной мере происходят и при использовании аммиачной селитры. В опытах, проведенных на опытной станции I.C.I (Англия) в Джиллот-Хилл [10], чистая мочевина или смесь ее с $CaCO_3$ при поверхностном внесении на лугах и на озимой пшенице дейст-

Таблица 14

Влияние местного внесения гранулированной мочевины и аммиачной селитры на урожай яровой пшеницы и сахарной свеклы

Дерново-подзолистый тяжелый суглинок ДАОС (урожай, г)

Способ внесения удобрений	Яровая пшеница		Сахарная свекла	
	зерно	солома	корни	ботва
Фон РК равномерно по всей массе почвы	5,6	7,8	8	12
Фон РК равномерно по всей массе почвы + $CO(NH_2)_2$	13,4	17,3	31	30
Фон РК равномерно по всей массе почвы + NH_4NO_3	13,2	17,0	36	33
Фон РК равномерно по сосуду + + $CO(NH_2)_2$ в сторону от рядка на 2 см	11,9	16,9	34	47
Фон РК равномерно по сосуду + + NH_4NO_3 в сторону от рядка на 2 см	12,4	17,1	33	41
Смесь РК и $CO(NH_2)_2$ в сторону от рядка на 2 см	14,1	17,3	36	42
Смесь РК и NH_4NO_3 в сторону от рядка на 2 см	12,9	18,3	35	35
Фон РК равномерно по сосуду + + $CO(NH_2)_2$ ниже семян на 2 см	13,4	19,3	34	41
Фон РК равномерно на сосуд + + NH_4NO_3 ниже семян на 2 см	13,6	18,1	23	37
Смесь РК + $CO(NH_2)_2$ ниже семян на 2 см	12,4	19,6	40	35
Смесь РК + NH_4NO_3 ниже семян на 2 см	13,6	20,3	29	32

вовала примерно так же, как и известково-аммиачная селитра (табл. 15).

Изучение опубликованных в различных изданиях данных полевых опытов по сравнительной оценке мочевины показывает, что, как правило, мочевина в этих опытах не уступает по своей эффективности другим видам азотных удобрений [11]. Небольшие отклонения в ту и другую сторону обычно не выходят за пределы ошибки эксперимента.

В Японии мочевина считается одной из лучших форм азотных удобрений для риса и других сельскохозяйственных культур. Производство и потребление ее в этой стране за последние годы резко возросло. Если еще в 1954 г. производство мочевины в Японии составляло около 40 тыс. тонн в пересчете на азот, то в 1962 г. оно достигло 400 тыс. тонн (N). По данным Mitsui [12], растениями риса в некоторых количествах используется также и CO_2, образующаяся при превращении мочевины в почве.

Таблица 15

Результаты опытов, проведенных в Джиллот-Хилл [10]
(урожай в ц/га)

Культуры	Число опытов	N_{54} кг/га		N_{101} кг/га		
		мочевина + $CaCO_3$	известково-аммиачная селитра	мочевина + $CaCO_3$	известково-аммиачная селитра	контроль без азота
1956 год						
Луга — сено (ранний укос)	22	12,2	13,3	15,3	18,1	5,7
Луга — сено	24	18,6	19,2	22,4	23,1	11,0
Озимая пшеница — зерно (поверхностное внесение азота)	16	40,0	41,1	42,4	42,5	34,5

	Число опытов	N_{35} кг/га			N_{64} кг/га			
		Мочевина	Мочевина + $CaCO_3$	Известково-аммиачная селитра	Мочевина	Мочевина + $CaCO_3$	Известково-аммиачная селитра	контроль без азота
1957 год								
Луга — сено	21	18,5	19,1	20,3	22,5	23,0	24,3	13,5

Однако работы Low [13] с применением стабильного изотопа углерода C^{13} показывают, что углерод мочевины, если и поступает в растения, то лишь в крайне незначительных количествах, не превышающих 0,1% общего количества внесенного с мочевиной углерода.

Выводы

1. Полученные экспериментальные данные по изучению сравнительной эффективности мочевины в различных почвенных зонах СССР и под разные культуры показывают, что в среднем из большого числа опытов (около 280) мочевина по своей эффективности равноценна аммиачной селитре.

2. Точные данные, проведенные с использованием изотопа N^{15}, показали, что коэффициент использования азота мочевины растениями при всех обычно применяемых на практике приемах ее внесения (поверхностное внесение по всходам, внесение на поверхность почвы до посева, равномерное распределение удобрения в почве) в условиях подзолистой суглинистой почвы и черноземной почвы не ниже, чем соответствующая величина для аммиачной селитры, а размер потерь азота из мо-

чевины при указанных способах внесения или такой же, или даже меньший, чем при использовании аммиачной селитры.

3. Так как эффективность мочевины во всяком случае не ниже, чем аммиачной селитры, то, учитывая ее лучшие физико-механические качества и более высокую концентрацию в сравнении с аммиачной селитрой, следует признать целесообразным самое широкое развитие ее производства и применения в сельском хозяйстве как удобрения при том условии, что ее стоимость (единица азота) будет близка к стоимости аммиачной селитры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jones W. W. Biuret toxicity of urea foliage sprays on citrus. Science. v. 1, 20, 1954.
2. Sanford W. G., Gowing D. P., Young H. Y., Leeper R. W. Toxicity to pineapple plants of biuret found in urea fertilizers from different sourees. Science, v. 120, 1954.
3. Starostka R. W., Clark K. G. Greenhouse evalution and nitrification characteristics of biuret and urea biuret mixtures. Agric. Chemicals, v. 10, 1955.
4. Gunningham R. K., Cookc G. W. Changes in levels of inorganic nitrogen in a clay-loam soil caused by fertilizer additions, by leaching and uptake by grass. J. Sci. Food and Agric, v. 9, 6. 1958.
5. Low A. J., Piper F. J. Urea as a fertilizer. J. Agric. Sci., v. 57, N 2, 1961.
6. Gasser J. K. Investigation on the use of urea as a fertilizer. Ph. D. Thesis Uniy. London, 1962.
7. Larsen S., Gunary D. Ammonia loss from ammonical fertilizers applied to calcareons soils J. Sci. Food and Agric., v. 13, N 11, 1962.
8. Турчин Ф. В. Превращение азотных удобрений в почве и усвоение их растениями. «Агрохимия» № 3, 1964.
9. Widdowson E. V., Penny A., Williams R. J. B. Side-placing urea and other nitrogen fertilizers for spring barley. J. Agric. Sci., v. 62, 1964.
10. Templeman W. G. Urea as a fertilizer. J. Agric. Sci., v. 57, N 2, 1961.
11. Buchner A., Kradel J. Die Anwendung von Harnstoff als Düngemittel. Z. Acker und Pflanzenbau, 114, N 1, 1961.
12. Mitsui S., Kurihara K. The intake and utilization of carbon by plant roots from C^{14} labelled urea. Soil Sci. and Plant Nutrition. v. 8, N 6, 1962.
13. Low A. J., Piper F. J. Nitrogen, sulphur and carbon uptake from some nitrogenous fertilizers using N^{15}, S^{35} and C^{14} as tracers. J. Agric. Sci., v. 49, N 1, 1957.

МОЧЕВИНО-ФОРМАЛЬДЕГИДНЫЕ УДОБРЕНИЯ*

В СССР и ряде зарубежных стран ведутся исследовательские работы по созданию труднорастворимого, но хорошо усвояемого растениями азотного удобрения.

Высокая растворимость и подвижность в почве азотных удобрений обычных видов не всегда полезны. В районах

* Статья написана в соавторстве с В. И. Соколовой и Б. Г. Блюм и опубликована в журнале «Химия в сельском хозяйстве», № 2, 1964.

достаточного увлажнения, особенно на легких почвах, азотные удобрения, благодаря именно этой подвижности, быстро вымываются и для сельскохозяйственных растений теряются. Во влажных субтропиках СССР коэффициент использования растениями азота удобрений (чайные хозяйства) 20—25%; 50—60% внесенного азота вымывается осадками. Значительны потери азота на легких почвах западных и некоторых центральных областей страны. Высокая подвижность азотных удобрений отрицательно влияет на использование их и в республиках Средней Азии, где они, даже если их вносят в аммиачной форме, быстро нитрифицируются и восходящими токами влаги выносятся на поверхность почвы, образуя своеобразные солевые выцветы.

В двух крайних случаях — избыточное увлажнение или сухой и жаркий климат — слишком быстрая миграция азота вниз или вверх по профилю почвы приводит к слабому использованию его растениями. Для этих областей требуется такое удобрение, которое бы постоянно находилось в том слое почвы, куда его внесли, в слое размещения основной массы корней.

Кроме того, даже самые высокие дозы труднорастворимых, но хорошо усвояемых азотных удобрений не создают избыточно вредных концентраций подвижного азота и высокого осмотического давления почвенного раствора, к которому чувствительны очень многие растения, особенно в начале своего развития. Создание удобрения, отвечающего указанным требованиям, — важная задача агрохимиков и технологов.

При компенсации мочевины с алифатическими альдегидами (формальдегидом, ацетальдегидом, пропионовым альдегидом) получаются конденсаты, содержащие азот в труднорастворимой форме. В 1916 г. Диксон и Тейлор впервые выделили и описали метиленмочевину ($(NH_2)_2COCH_2$), образующуюся при определенных условиях конденсации мочевины с формальдегидом. Метиленмочевина гидролизуется минеральными кислотами, в холодной воде нерастворима, в горячей — отчасти.

В США в 1939 г. компания «Дюпон» получила на опытной установке конденсацией мочевины с формальдегидом удобрение, содержащее около 38% азота, основная масса которого нерастворима в холодной воде. Это удобрение назвали уреаформом. Позже удобрения такого типа получили в ГДР и некоторых других странах.

Опыты, проведенные в США, Англии, ГДР, Японии и др. [1—4], показали, что в почве азот уреаформа очень медленно превращается в нитратную форму и практически из почвы не вымывается, но в то же время благодаря происходящим биологическим и физико-химическим процессам он становится доступным растениям.

Необходимо отметить, что использование растениями азота мочевино-формальдегидных удобрений, изготовленных в разных

странах, колеблется в довольно широком интервале. Это связано с тем, что условия изготовления оказывают существенное влияние на химический состав этих препаратов и на доступность их азота растениям. Важное значение имеют температура, при которой производится конденсация мочевины с формальдегидом, соотношение этих компонентов в реакционной смеси, pH, продолжительность конденсации и т. п. В кислой среде первый продукт конденсации — метилолмочевина $NH_2CONHCH_2OH$ — соединение, хорошо растворимое в холодной воде и сравнительно быстро гидролизующееся в почве. В ходе процесса метилолмочевина конденсируется в метиленмочевину с выделением H_2O.

$$NH_2CONHCH_2OH \rightarrow NH_2CONHCH_2 + H_2O.$$

Метиленмочевина полимеризуется в продукт с большим или меньшим числом метиленмочевинных групп. Этот продукт — основное вещество мочевино-формальдегидных удобрений. Ценность его как источника азота для растений в значительной мере определяется его способностью к гидролизу и к расщеплению на более лабильные формы. Последнее зависит от степени полимеризации и структуры рассматриваемого вещества. Кроме основного продукта, мочевино-формальдегидные удобрения содержат метилолмочевину и небольшое количество непрореагировавшей мочевины. В зависимости от условий конденсации содержание их в удобрении значительно варьирует. Это вносит существенные расхождения в оценку эффективности мочевино-формальдегидных удобрений.

В опытах, проведенных в США и ГДР, показано, что соотношение мочевины и формальдегида в реакционной смеси оказывает большое влияние на скорость нитрификации уреаформа в почве и на эффективность его азота (Кларк, 1956; Ансорг, 1962) [1, 2]. При отношении, близком к эквимолярному (примерно моль мочевины на моль формальдегида), нитрификация уреаформа протекала крайне медленно и азот его очень слабо усваивался растениями. При более высоком молярном отношении мочевины к формальдегиду интенсивность нитрификации уреаформа и доступность его азота растениям повышалась.

Подобные результаты получены и Научным институтом по удобрениям и инсектофунгицидам (НИУИФ). В опытах изучали препараты, синтезированные в Лаборатории химической технологии МГУ под руководством акад. С. И. Вольфковича, названные им карбамиформом (табл. 1).

Изучение образцов карбамиформа показало, что водорастворимая фракция азота обоих препаратов усваивается растениями, как и азот обычных удобрений, но существует значительное различие в усвояемости нерастворимого азота (табл. 2, 3).

Из приведенных в таблицах 2 и 3 данных видно, что нерастворимый азот карбамиформа I усваивался растениями чрез-

Таблица 1

Содержание азота в препаратах карбамиформа

Препараты карбамиформа	Молярное отношение мочевины к формальдегиду	Содержание общего азота, %	Содержание водорастворимого азота, %	Водорастворимый азот, % от общего азота
I	1,25 : 1	39,6	10,0	25,28
II	1,50 : 1	41,6	16,68	40,1

Таблица 2

Вынос азота урожаем овса в вегетационном опыте с различными препаратами карбамиформа

Удобрения	Доза азота, г			Урожай сухой зеленой массы овса, г	Азот в урожае, г	Использование растениями азота из удобрения, г
	весь азот	в том числе				
		водорастворимый	водонерастворимый			
РК фон (контроль)	—	—	—	10,1	0,093	—
РК + мочевина	1,0	1,0	—	71,8	0,808	0,715
РК + карбамиформ I	1,0	0,256	0,744	38,5	0,340	0,247
РК + карбамиформ I	3,0	0,768	2,232	72,3	0,815	0,722
РК + карбамиформ II	1,0	0,401	0,599	60,5	0,546	0,453
РК + карбамиформ II	3,0	1,203	1,797	82,3	1,557	1,464

Таблица 3

Вынос азота урожаем овса в вегетационном опыте с карбамиформами, предварительно отмытыми от водорастворимой фракции

Удобрения	Доза азота, г	Урожай сухой зеленой массы овса, г	Азот в зеленой массе овса, г	Вынос азота урожаем, г	Использование азота растениями из удобрений, %
РК фон (контроль)	—	14,3	0,878	0,125	—
РК + мочевина	0,3	38,3	1,035	0,398	90
РК + мочевина	1,0	56,4	1,560	0,880	75,5
РК + карбамиформ I отмытый	1,0	24,4	0,945	0,231	10,6
РК + карбамиформ I отмытый	3,5	46,9	1,035	0,487	10,4
РК + карбамиформ II отмытый	1,0	42,9	0,740	0,317	19,2
РК + карбамиформ II отмытый	3,5	64,6	0,945	0,610	13,9

вычайно слабо. Коэффициент использования его за один вегетационный сезон не превышал 10%, коэффициент использования нерастворимого азота карбамиформа II почти в 2 раза выше.

Эти данные хорошо коррелируют с результатами опытов по изучению превращения в почве нерастворимого азота карбамиформа I и II (табл. 4).

Таблица 4

Степень нитрификации нерастворимого азота препаратов карбамиформов I и II (опыты в лабораторных условиях, температура 25° С, влажность 60% от полной влагоемкости)

Препараты	Почва	Продолжительность компостирования с почвой, дней	% нитрифицировавшегося азота от внесенного количества
Карбамиформ I	Подзолистая суглинистая	45	0
Карбамиформ I	То же	70	22
Карбамиформ II	„ „	45	8
Карбамиформ II	„ „	70	42
Карбамиформ I	Серозем	45	5
Карбамиформ I	То же	70	7
Карбамиформ II	„ „	45	10,5
Карбамиформ II	„ „	70	31

Большое влияние на эффективность мочевино-формальдегидных удобрений оказывает температура конденсации мочевины с формальдегидом. При температуре 30—40° С и при оптимальном молярном отношении получают продукты с наиболее высокой усвояемостью азота, дальнейшее повышение температуры конденсации приводит к снижению эффективности получаемого продукта. Это хорошо видно по результатам опытов НИУИФ, в которых изучались отдельные препараты карбамиформа, изготовленные в лаборатории ГИАП (Государственный институт производства и проектирования азотной промышленности) при одном и том же молярном отношении мочевины и формальдегида (2 : 1), но при разных температурах (табл. 5).

Препарат 36 (температура конденсации 30°С) достаточно эффективен, его нерастворимый азот хорошо усваивается растениями. Совершенно иные результаты дало испытание препарата 37, полученного при сравнительно высокой температуре конденсации 60°С. Этот препарат оказывал некоторое положительное действие на растения лишь благодаря наличию в нем водорастворимой фракции азота. Но когда эту фракцию отмыли, эффективность препарата резко снизилась. Следовательно, при современном состоянии технологии получения мочевино-формальдегидных удобрений температура конденсации не должна превышать 30—40°С.

Таблица 5

Влияние температуры конденсации при получении карбамиформа на его эффективность (доза азота — 1,0 г на сосуд)

Препараты карбамиформа	Температура конденсации, °С	Содержание водорастворимого азота, % от общего азота препарата	Урожай овса, г		Вынос азота урожаем, мг
			зерно	солома	
Контроль (без азота)	—	—	8,2	13,1	186
Препарат 37	60	17,2	16,8	21,2	335
Препарат 36	30	26,8	25,7	28,8	638
Препарат 37, отмытый от водорастворимой фракции	60	—	10,6	14,8	275
Препарат 36, отмытый от водорастворимой фракции	30	—	27,7	27,8	585

В настоящее время в ГИАП (С. Д. Фридман и др.) разработаны оптимальные условия изготовления карбамиформов с высокой степенью доступности для растений водорастворимого азота:

молярное отношение мочевина : формальдегид	2 : 1
температура конденсации, °С	30
pH реакционной смеси	3,0
регулятор pH	H_2SO_4 или H_3PO_4
продолжительность конденсации, час.	1

Состав препаратов, полученных при этих условиях, приведен в таблице 6.

Таблица 6

Характеристика препаратов карбамиформа

Препараты	Содержание общего азота, %	Азот, растворимый в горячей воде, %	Азот, растворимый в холодной воде, %	Содержание общего нерастворимого азота в препарате после отмывания азота холодной водой, %
Карбамиформ 36 (pH регулируется добавлением H_2SO_4)	31,9	8,7	5,4	30,0
Карбамиформ 43 (pH регулируется добавлением H_3PO_4)	37,0	11,5	7,2	35,4

В опытах по испытанию препаратов карбамиформа 36 и 43 их действие сравнивалось с действием обычной мочевины (табл. 7).

Таблица 7

Эффективность мочевины и различных препаратов карбамиформа в вегетационном опыте с овсом

Источники азота	Доза азота, г/сосуд	Урожай овса, г		Вынос азота, мг	Использование растениями азота удобрений, г	Коэффициент использования азота удобрений, %
		зерно	солома			
РК фон (контроль)	—	8,2	13,1	186	—	—
РК + мочевина	0,5	23,6	28,2	529	343	69
РК + мочевина	1,0	31,9	33,5	834	648	65
РК + карбамиформ 36	1,0	25,7	29,2	638	452	45
РК + карбамиформ 43	1,0	28,2	30,2	752	566	57
РК + карбамиформ 36 отмытый	1,0	27,7	27,8	585	399	40
РК + карбамиформ 43 отмытый	1,0	28,5	28,2	662	476	48

Из таблицы 7 видно, что нерастворимый азот этих препаратов по своей доступности растениям и эффективности приближался к азоту мочевины. Если принять за 100 прибавку урожая и степень использования азота мочевины, то прибавка урожая от такой же дозы азота препаратов карбамиформа выразится величинами, приведенными в таблице 8.

Таблица 8

Действие на урожай растений мочевины и карбамиформа

Виды удобрений	Прибавка урожая, %	Использование азота, %
Мочевина	100	100
Карбамиформ 36	74	70
Карбамиформ 43	84	87
Карбамиформ 36 отмытый	82	62
Карбамиформ 43 отмытый	77	74

Важной особенностью карбамиформа, синтезированного в ГИАП (молярное отношение мочевина : формальдегид = 2 : 1, температура конденсации 30°С, pH смеси 3), является то, что эти препараты в отличие от препаратов, имеющихся на зарубежном рынке, могут сравнительно достаточно обеспечивать растения азотом уже в первое время после внесения даже в том случае, если полностью отмыты от водорастворимого азота. Это подтверждает опыт, в котором учет урожая овса производили до образования колоса через 45 дней после посева (табл. 9).

Растения за 45 дней из небольшой дозы карбамиформа усвоили довольно значительное количество азота. При внесении же второй дозы карбамиформа урожай стал близок к уро-

Таблица 9

Эффективность мочевины и карбамиформа в краткосрочном вегетационном опыте с овсом

Удобрения	Урожай сухой зеленой массы, г	Содержание азота в растениях, %	Вынос азота урожаем, мг
РК — фон (контроль)	7,7	1,52	117
РК + мочевина 0,5 г азота	14,0	3,12	436
РК + мочевина 0,1 г азота	14,0	3,95	555
РК + карбамиформ 36 0,5 г азота	11,7	2,11	233
РК + карбамиформ 36 1,0 г азота	12,9	2,54	328

жаю по мочевине. Однако карбамиформ не обеспечил тот уровень концентрации усвояемого азота, который создается в почве растворимыми азотными удобрениями. Процент азота в молодых растениях, выращенных при внесении карбамиформа, был значительно ниже, чем у тех, которым давали мочевину. Но избыток растворимого азота в почве не всегда нужен, а часто бывает даже и вреден. В этом опыте первой дозы мочевины было вполне достаточно для начальных этапов роста растений, вторая доза уже не усилила их рост, а только повысила содержание азота в растениях.

В опыте с кукурузой увеличение дозы азота, внесенного в форме мочевины, вызвало даже снижение урожая, в то время как та же доза азота, внесенная с карбамиформом, дала максимальную прибавку урожая сухой массы кукурузы (табл. 10).

Таблица 10

Влияние высоких доз азота на кукурузу

Удобрение	Доза азота, г	Урожай сухой массы кукурузы, г	Прибавка урожая от азота, г
РК — фон (контроль)	—	27,5	—
РК + мочевина	1,5	96,5	69,0
РК + мочевина	3,0	77,5	50,0
РК + карбамиформ 42	3,0	113,5	86,0

Постепенная гидролизация карбамиформа в почве делает это удобрение особенно эффективным для тех видов растений, которые проявляют повышенную чувствительность, особенно в первые стадии развития, к избытку усвояемого азота или к повышению осмотического давления, вызываемого внесением растворимых азотных удобрений. Например, лен-долгунец в начале своей жизни весьма чувствителен даже к умеренным до-

зам азотных удобрений, поэтому считалось, что под лен нужно вносить не больше 30—40 кг азота на гектар.

Опыты, проведенные на Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ, показали, что внесение под лен карбамиформа в дозах, превосходящих обычные нормы азота, не только не привело к каким-либо отрицательным результатам, но, наоборот, создало наиболее благоприятные условия для развития льна.

Для выяснения степени вымывания азота из различных форм удобрений при внесении их в почву провели лабораторный опыт. В почву вносили по 600 мг азота в виде аммиачной селитры, мочевины и трех образцов карбамиформа. Перемешанную с удобрениями почву помещали в сосуды Митчерлиха и промывали 2,5 л дистиллированной воды. В прошедшей через почву воде определяли содержание общего азота (табл. 11).

Таблица 11

Степень вымываемости азота из различных видов удобрений при внесении их в почву (доза азота = 600 мг)

Удобрение	Содержание водорастворимого азота, % от общего	Всего вымыто азота из почвы, мг	Вымыто азота из удобрения, мг	Степень вымываемости из удобрений, %
Без азота — контроль	—	298	—	—
Аммиачная селитра	100	686	388	65
Мочевина	100	527	229	38
Карбамиформ I	25,6	425	127	22
Карбамиформ II	4,6	327	29	5
Карбамиформ III	9,3	353	55	9

Данные таблицы 11 показывают, что больше всего азота вымылось из аммиачной селитры, значительно меньше из мочевины, основная масса азота которой превратилась в почве в аммиачную, менее подвижную форму азота. Из карбамиформов вымылся только водорастворимый азот. Следует отметить, что в почве аммиачный азот аммиачной селитры и амидный азот мочевины сравнительно быстро нитрифицируется и переходит в легкоподвижное состояние, что значительно увеличивает потери азота из этих удобрений. Весь образующийся нитратный азот растения успевают полностью использовать. Поэтому потери азота из карбамиформа за счет вымывания незначительны в течение всего вегетационного периода.

Карбамиформ — перспективное удобрение не только для избыточно влажных районов Закавказья и орошаемых районов Средней Азии, но и для отдельных культур в других районах нашей страны, например для льна, некоторых овощных куль-

тур и особенно для культур закрытого грунта, где требуется постоянный и оптимальный уровень снабжения растений азотом.

Несмотря на то что единица азота в карбамиформе при всех условиях будет стоить дороже, чем в обычных азотных удобрениях, использование карбамиформа для указанных выше целей весьма целесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clark K. G., Jee T. J. J. Agric a Food Chem. 4, N 2, 135—140 (1956).
2. Ansorge H., Landwirtsch. Z. Versuchs. — Untersuchungswesen., 8, N 5, 357—368 (1962).
3. Winson L. W., Long I. E. J. Sci. Food. Agric 7, 5 (1956).
4. Ishizuka J., Takagishi H. J. Sci. Soil a Manuze, 29, 11 (1959), Japan.

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕЙСТВИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ КИСЛЫХ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ ПУТЕМ ИХ ИЗВЕСТКОВАНИЯ*

Физиологическая или биологическая кислотность сульфата аммония, хлористого аммония, нитрата аммония и других кислых форм азотных удобрений отрицательно сказывается на их эффективности в условиях применения на ненасыщенных основаниями кислых почвах. Наиболее резко сказывается отрицательное влияние физиологической кислотности этих форм азотных удобрений при их длительном систематическом применении, в особенности на легких слабобуферных почвах. Результаты длительных полевых опытов, проведенных на Долгопрудном и Люберецком опытных полях НИУИФ [1], равно как и имеющиеся иностранные данные [2, 3 и др.], показывают, что физиологически кислые формы азотных удобрений при ежегодном их применении на одном и том же участке через несколько лет после их непрерывного применения теряют свою эффективность. При этом на более связных почвах понижение эффективности аммиачных удобрений начинается позже, на более же легких малобуферных почвах падение эффективности аммиачных удобрений начинается значительно быстрее.

Нейтрализация кислотности почвы путем внесения соответствующего количества известковых материалов устраняет отрицательное влияние физиологической кислотности аммиачных удобрений, и эффективность их на известкованной почве в большинстве случаев приближается к эффективности нитратных форм азота. Таким образом, известкование, помимо важ-

* Статья опубликована в журнале «Химизация социалистического земледелия» № 8, 1939.

ной роли его как фактора коренной мелиорации кислых почв, является также мероприятием, обеспечивающим нормальную эффективность физиологически кислых аммиачных удобрений на почвах, не насыщенных основаниями.

Однако при известковании почв обычно приходится вносить сравнительно большое количество известняка — от 3 до 8 т/га и даже более, в зависимости от свойств почвы, поэтому известкование всех почв Союза, нуждающихся в извести, вследствие затруднений, связанных со снабжением и доставкой на поле необходимого количества известняка, может быть осуществлено только в течение ряда лет.

Основная масса азотных удобрений, потребляемых в сельском хозяйстве СССР, представлена в настоящее время физиологически (и биологически) кислыми формами. В условиях почв, насыщенных основаниями (обыкновенные и мощные черноземы, среднеазиатские сероземы и т. п.), обладающих высокой нейтрализующей способностью, подкисляющее действие физиологически кислых форм азота практически не сказывается на их эффективности, поэтому такие удобрения, как сульфат аммония и нитрат аммония, могут быть использованы здесь не менее эффективно, чем кальциевая селитра (физиологически щелочное удобрение).

В условиях кислых, не насыщенных основаниями почв физиологически и биологически кислые формы азотных удобрений, особенно при их систематическом применении, по своей эффективности значительно уступают физиологически щелочным формам азота — кальциевой и натриевой селитрам. Однако производство последних обходится дороже по сравнению с производством сульфата и нитрата аммония. Это побуждает искать новые пути рационального и эффективного использования более дешевых физиологически кислых форм азота. За границей выпускается смесь или сплав нитрата аммония с мелом. Образующаяся в почве из нитрата аммония кислота в момент ее возникновения нейтрализуется за счет мела, поэтому смесь является физиологически нейтральной [4, 5]. В США введено в широкую практику применение тукосмесей, содержащих в своем составе известняк или доломит. Известняк или доломит вводятся в удобрительные смеси как для улучшения их физических свойств, так и для нейтрализации потенциальной кислотности входящих в состав тукосмесей кислых форм азотных удобрений. Нейтрализация физиологически кислых форм азота путем введения в их состав мела заметно повышает их эффективность на кислых почвах. Вегетационные опыты, проведенные в нашей лаборатории на легкой оподзоленной супеси Люберецкого опытного поля еще в 1934 г., показали, что действие физиологически кислых аммиачных удобрений резко повышается при внесении их в смеси с эквивалентным количеством $CaCO_3$ [6].

Нейтрализованный мелом сульфат аммония действовал в этих опытах даже несколько сильнее кальциевой селитры, в то время как обычный, ненейтрализованный сульфат аммония по своему действию на урожай ячменя сильно отставал от кальциевой селитры.

В вегетационных опытах 1937 г. изучалось влияние известкования различных физиологически кислых форм азота на двух почвах — на легкой оподзоленной супеси Люберецкого опытного поля и на подзолистом суглинке Долгопрудного опытного поля. Особенно интересные данные были получены в опыте, проведенном со льном на оподзоленном суглинке Долгопрудного опытного поля, данные которого приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Удобрения*	Урожай льна, г/сосуд	
	общий	семена
PK без азота	16,5	4,0
PK + NH_4NO_3	30,5	5,8
PK + $(NH_4)_2SO_4$	29,2	6,4
PK + NH_4Cl	21,2	4,0
PK + NH_4NO_3 в смеси с 2,2 г $CaCO_3$	33,0	8,3
PK + $(NH_4)_2SO_4$ в смеси с 2,95 г $CaCO_3$	35,7	8,4
PK + NH_4Cl в смеси с 2,95 г $CaCO_3$	30,9	6,7
PK + $(NH_4)_2SO_4$ + 2,95 г $CaCO_3$ раздельно от сульфата аммония	31,5	6,3
PK + NH_4Cl + 2,95 г $CaCO_3$ раздельно от хлористого аммония	21,9	4,9

* Дозы удобрений в г на сосуд: N — 0,6; P_2O_5 — 0,5; K_2O — 0,6.

Как видно из таблицы 1, добавка сравнительно небольших количеств $CaCO_3$ к кислым формам азотных удобрений заметно повышала их эффективность. Даже отрицательное влияние на лен хлор-иона в хлористом аммонии значительно смягчалось при внесении его в смеси с эквивалентным количеством $CaCO_3$. Известкование кислых азотных удобрений особенно благоприятно сказалось на урожае семян льна. Внесение тех же количеств $CaCO_3$ не в смеси с азотным удобрением, а раздельно почти не оказывало влияния на эффективность аммиачных форм азота. По-видимому, это объясняется тем, что внесение сравнительно небольших количеств $CaCO_3$ (2,2—2,95 г на сосуд) лишь в малой степени могло нейтрализовать кислотность почвы, потребность которой в извести составляла 17,4 г $CaCO_3$ на сосуд.

В 1938 г. для изучения влияния известкования физиологически кислых азотных удобрений на их эффективность был проведен полевой опыт с яровой пшеницей на сильноподзоли-

стом, тонкопесчаном суглинке Соликамской опытной станции. Несмотря на плохие метеорологические условия 1938 г., отрицательно сказавшиеся на урожае пшеницы, действие соответствующих комбинаций удобрений в этом опыте проявилось достаточно отчетливо. Схема и результаты этого опыта приведены в таблице 2.

Таблица 2

Схема опыта*	Урожай яровой пшеницы, ц/га	
	зерно	солома
Без удобрения	2,68	3,82
Известь по гидролитической кислотности почвы — 4,8 т/га	4,87	7,00
P_2O_5 — 60 кг/га; K_2O — 60 кг/га (фон)	2,41	6,89
Фон + NH_4NO_3 — 60 кг/га	3,70	8,33
Фон + NH_4NO_3 — 60 кг/га + известь по гидролитической кислотности — 4,8 т/га	8,93	12,62
Фон + NH_4NO_3 + 145 кг/га извести в смеси с NH_4NO_3	6,91	11,78
Фон + NH_4NO_3 + 145 кг/га извести раздельно от NH_4NO_3	5,96	13,05
P_2O_5 фосфорита	4,38	11,82

* N в форме NH_4NO_3 вносился 60 кг/га; P_2O_5 в форме суперфосфата и K_2O в форме 40%-ной калийной соли вносилось по 60 кг/га. В варианте 8-м, как и в других вариантах, было внесено K_2O 60 кг/га; P_2O_5 суперфосфата внесено 30 кг, остальные 30 кг P_2O_5 внесены в фосфорите в смеси его с нитратом аммония.

Как видно из приведенных данных, почва в этом опыте сильно нуждалась в извести, и ее внесение дало значительный эффект. Прибавка урожая от нитрата аммония, обладающего сравнительно умеренной биологической кислотностью, была незначительна. Применение нитрата аммония (в комбинации с РК) на фоне извести, внесенной по гидролитической кислотности (4,8 т/га), дало наибольшую прибавку урожая в опыте.

Смешение нитрата аммония со сравнительно небольшим количеством извести (145 кг/га извести на 60 кг/га N в нитрате аммония или примерно 0,8 весовой части извести на 1 весовую часть нитрата аммония) резко повышало эффективность этого удобрения.

Таким образом, в условиях данного опыта нейтрализация физиологической кислотности удобрения, потребовавшая всего 3% извести от количества, необходимого для нейтрализации кислотности почвы, дала ясные положительные результаты.

Вместе с тем из приведенных данных видно, что внесение извести в том же количестве, необходимом для нейтрализации потенциальной кислотности удобрений не в смеси с азотным

удобрением, а раздельно от него, также оказало сравнительно хорошее действие, хотя величина прибавки урожая зерна пшеницы в этом случае и была ниже, чем при внесении $CaCO_3$ в смеси с NH_4NO_3. Смешение нитрата аммония с фосфоритом мало повлияло на урожай зерна пшеницы, так как нейтрализующее действие фосфорита сказывается значительно слабее, чем извести. На урожае соломы «фосфоритование» азотного удобрения сказалось все же достаточно благоприятно.

Исходя из теоретических соображений, можно было бы ожидать что внесение аммиачных форм азотных удобрений должно было оказать влияние не только на кислотность почв, но и на условия фосфатного питания растений. В наших прежних исследованиях было установлено, что потребность растений в фосфоре при аммиачном источнике азота в условиях песчаных или водных культур сказывается значительно слабее, чем при нитратном питании растений [7]. Этот факт находит свое объяснение в том, что фосфор, помимо других жизненных функций, оказывает влияние на восстановление нитратов в растениях, поэтому при нитратном питании фосфор необходим растениям в большем количестве, чем при аммиачном питании.

В почвенных условиях фиксация и адсорбция фосфатов оказывают существенное влияние на питание растений.

Если на почвах, не содержащих заметных количеств подвижных соединений железа и алюминия, например на почвах черноземного типа, на карбонатных почвах и т. п., так же как и в условиях песчаных культур, при внесении нитратных удобрений потребность растений в фосфатах будет большей, чем при внесении азота в аммиачной форме *, то на кислых подзолистых

* Этот вывод подтверждается следующими результатами вегетационного опыта, проведенного на мощном черноземе Граковского опытного поля НИУИФ. Опыт показывает, что для рационального использования нитратного азота необходимо вносить больше P_2O_5, чем при использовании на удобрение аммиачного азота.

Схема опыта	Урожай ячменя, г/сосуд	
	общий	зерно
K (фон)	8,9	3,2
K + $Ca(NO_3)_2$ без P_2O_5	19,6	10,1
K + $(NH_4)_2SO_4$ без P_2O_5	24,3	11,8
K + $Ca(NO_3)_2$ + 0,2 г P_2O_5	21,8	11,6
K + $(NH_4)_2SO_4$ + 0,2 г P_2O_5	27,9	14,9
K + $Ca(NO_3)_2$ + 0,5 г P_2O_5	28,9	14,7
K + $(NH_4)_2SO_4$ + 0,5 г P_2O_5	29,0	13,4

Примечание. Опыт проведен И. Н. Федотовой. Дозы: N — 0,5 г на сосуд, K_2O — 0,5 г на сосуд в KCl, P_2O_5 вносилась в форме $Ca(H_2PO_4)_2$.

почвах, содержащих значительные количества реакционно способных полуторных окислов, можно ожидать обратного. Внесение физиологически кислых аммиачных удобрений будет вызывать дальнейшее повышение подвижности полуторных окислов; последние же, реагируя с фосфатами, будут связывать их в малодоступные для растений соединения. Поэтому при внесении физиологически кислых аммиачных и аммиаксодержащих удобрений в кислые подзолистые почвы доступность растениям P_2O_5 в той или иной степени может понижаться, а следовательно, в этом случае возникает необходимость внесения повышенных доз P_2O_5 *.

Нейтрализация потенциальной кислотности физиологически кислых удобрений должна в значительной степени устранять этот отрицательный момент в их действии (т. е. повышение фиксации P_2O_5 полуторными окислами в труднодоступные для растений соединения) и создавать условия для более экономного и рационального использования фосфатов в условиях кислых подзолистых почв.

Приведенные здесь соображения подтверждаются данными вегетационных опытов, проведенных в 1938 г. на подзолистом суглинке Долгопрудного опытного поля НИУИФ (табл. 3).

При малой дозе P_2O_5 (0,15 г) физиологически кислый сульфат аммония совершенно не повышал урожая ячменя, тогда как нитрат аммония, потенциальная кислотность которого значительно меньше, чем сульфата аммония, и особенно кальциевая селитра дали значительные прибавки урожая по сравнению с фоном РК. В то же время при повышенной дозе P_2O_5 действие сульфата аммония проявлялось вполне рельефно, а нитрат аммония на фоне повышенной дозы P_2O_5 (0,5 г) в этих условиях дал почти такой же эффект, как и кальциевая селитра.

При нейтрализации потенциальной кислотности сульфата аммония и нитрата аммония путем смешения этих удобрений с эквивалентным количеством $CaCO_3$ их эффективность на фоне низкой дозы P_2O_5 резко повышалась.

Урожаи ячменя по нейтрализованным сульфату аммония и нитрату аммония были примерно те же, что и урожаи по кальциевой селитре. Внесение того же количества $CaCO_3$ не в смеси с сульфатом аммония, а раздельно, оказало положительное влияние, однако все же урожай растений при этом получился ниже, чем при внесении $(NH_4)_2SO_4$ и $CaCO_3$ в смеси. В варианте с нитратом аммония раздельное внесение эквивалентного

---

* Высокую эффективность повышенных доз P_2O_5 при внесении в кислые подзолистые почвы потенциально кислых азотных удобрений можно объяснить не только отрицательным влиянием последних на доступность растениям P_2O_5, но и устранением под влиянием высоких доз фосфатов токсического действия на растения подвижного алюминия, мобилизуемого в почве внесением кислых форм азотных удобрений. *Редакция.*

Таблица 3

Схема опыта*	Урожай ячменя, г/сосуд	
	общий	зерно
$K_2O + P_2O_5$ 0,15 г без N	11,1	4,8
$K_2O + P_2O_5$ 0,15 г + $Ca(NO_3)_2$	23,2	11,7
$K_2O + P_2O_5$ 0,15 г + $(NH_4)_2SO_4$	11,4	4,4
$K_2O + P_2O_5$ 0,15 г + $(NH_4)_2SO_4$ в смеси с 2,3 г $CaCO_3$	23,2	9,7
$K_2O + P_2O_5$ 0,15 г + $(NH_4)_2SO_4$ + 2,3 г $CaCO_3$ раздельно	19,1	8,2
$K_2O + P_2O_5$ 0,15 г + NH_4NO_3	17,2	7,4
$K_2O + P_2O_5$ 0,15 г + NH_4NO_3 в смеси с 1,15 г $CaCO_3$	23,7	10,5
$K_2O + P_2O_5$ 0,15 г NH_4NO_3 + 1,15 г $CaCO_3$ раздельно	18,0	7,0
$K_2O + P_2O_5$ 0,5 г без N	11,8	4,3
$K_2O + P_2O_5$ 0,5 г + $Ca(NO_3)_2$	31,5	12,6
$K_2O + P_2O_5$ 0,5 г + $(NH_4)_2SO_4$	25,5	10,6
$K_2O + P_2O_5$ 0,5 г + $(NH_4)_2SO_4$ в смеси с 2,3 г $CaCO_3$	29,0	12,6
$K_2O + P_2O_5$ 0,5 г + $(NH_4)_2SO_4$ + 2,3 г $CaCO_3$ раздельно	29,9	12,8
$K_2O + P_2O_5$ 0,5 г + NH_4NO_3	29,0	12,7
$K_2O + P_2O_5$ 0,5 г + NH_4NO_3 в смеси с 1,15 г $CaCO_3$	32,9	14,3

* Дозы в г на сосуд: N — 0,6, K_2O — 0,6 (в KCl), P_2O_5 — в $Ca(H_2PO_4)_2$, $CaCO_3$ вносится в количестве, эквивалентном содержанию аммиачного азота в удобрении.

количества $CaCO_3$ почти не оказывало влияния на действие NH_4NO_3.

На фоне повышенной дозы P_2O_5 нейтрализация физиологической кислотности сульфата и нитрата аммония путем смешения этих удобрений с эквивалентным количеством $CaCO_3$ хотя и увеличивала их эффективность, но в меньшей степени, чем при пониженной дозе P_2O_5 (0,15 г).

Так, прирост урожая ячменя от известкования физиологически кислых форм азота при внесении различных доз P_2O_5 выразился в следующих величинах (табл. 4).

Результаты этого опыта показывают, что на фоне повышенной дозы P_2O_5 вредное действие физиологической кислотности аммиачных и аммиаксодержащих удобрений в значительной степени устраняется.

В другом опыте изучалось влияние трех доз P_2O_5 на действие кальциевой селитры и сульфата аммония обычного и нейтрализованного мелом. Результаты этого опыта приведены в таблице 5.

Таблица 4

Прирост урожая от известкования кислых форм азотных удобрений, г/сосуд

Дозы P_2O_5 (фон)	Азотные удобрения			
	$(NH_4)_2SO_4$		NH_4NO_3	
	общий урожай	зерно	общий урожай	зерно
0,15 г P_2O_5	11,8	5,3	6,5	3,1
0,5 г P_2O_5	3,5	2,0	2,9	1,6

Таблица 5

Схема опыта (фон РК*)	Доза P_2O_5, г/сосуд	Урожай ячменя, г/сосуд		% P_2O_5 в надземной массе растений (зерно + солома)	Содержание P_2O_5 в урожае ячменя (в мг P_2O_5 на сосуд)
		общий	зерно		
1. Без азота	0,15	8,9	4,3	0,645	57,5
2. Ca $(NO_3)_2$	0,15	17,0	7,5	0,580	99,0
3. $(NH_4)_2SO_4$	0,15	9,6	3,4	0,550	52,7
4. $(NH_4)_2SO_4$ в смеси с $CaCO_3$ (2, 3 г)	0,15	19,4	7,4	0,585	113,0
5. Без азота	0,30	9,9	4,5	0,680	67,3
6. Ca $(NO_3)_2$	0,30	18,1	8,2	—	—
7. $(NH_4)_2SO_4$	0,30	13,0	3,8	0,510	66,5
8. $(NH_4)_2SO_4$ в смеси с $CaCO_3$ (2, 3 г)	0,30	20,6	7;9	0,597	123,0
9. Без азота	0,60	9,6	5,4	0,700	67,2
10. Ca $(NO_3)_2$	0,60	19,9	6,9	0,585	116,5
11. $(NH_4)_2SO_4$	0,60	18,6	8,1	0,504	94,0
12. $(NH_4)_2SO_4$ в смеси с $CaCO_3$ (2, 3 г)	0,60	22,7	7,5	0,695	157,8

* Опытное растение — ячмень. Доза N — 0,6 г на сосуд; K_2O — 0,4 г на сосуд (в KCl); P_2O_5 в форме $Ca(H_2PO_4)_2$.

Действие кальциевой селитры и нейтрализованного сульфата аммония в этом опыте было примерно одинаковым; при этом повышение дозы P_2O_5 с 0,15 до 0,3 и 0,6 г сравнительно слабо отражалось на действии этих удобрений.

Обычный, ненейтрализованный, сультат аммония при малой дозе P_2O_5 (0,15 г) не оказывал положительного влияния на урожай растений по сравнению с фоном РК. При увеличении дозы P_2O_5 до 0,3 г на сосуд внесение обычного сульфата аммония несколько повысило общий урожай (за счет соломы), но не сказалось на урожае зерна, и только при дозе P_2O_5 0,6 г

на сосуд урожай по сульфату аммония почти приблизился к урожаю, полученному по кальциевой селитре и по нейтрализованному сульфату аммония. Таким образом, в условиях этого опыта для получения одинакового урожая при применении физиологически кислого сульфата аммония потребовалось внести в 4 раза больше P_2O_5, чем при внесении нейтрализованного (известкованного) сульфата аммония. Растения из этого опыта после уборки были проанализированы на содержание P_2O_5.

В вариантах без азота по РК процентное содержание фосфорной кислоты было наиболее высоким, что и понятно, так как в этом случае в минимуме был азот и фосфора с избытком хватало на создание сравнительно небольшой массы растений.

Наименьший процент P_2O_5 был отмечен при всех дозах P_2O_5 в вариантах с сульфатом аммония (без нейтрализации его $CaCO_3$). Внесение сульфата аммония в смеси с эквивалентным количеством $CaCO_3$ заметно повышало процент P_2O_5 в растениях по сравнению с растениями, получившими обычный (ненейтрализованный) сульфат аммония. Следует отметить, что процент P_2O_5 в растениях по нейтрализованному сульфату аммония на фоне высокой дозы P_2O_5 был более высоким, чем по кальциевой селитре, что обусловливалось положительным влиянием иона NH_4 на интенсивность поступления фосфорной кислоты в растение.

Вынос фосфорной кислоты с урожаем растений при первых двух дозах P_2O_5 (0,15 и 0,30 г P_2O_5 на сосуд) по нейтрализованному мелом сульфату аммония был примерно в 2 раза выше, чем по обычному сульфату аммония; даже при внесении сравнительно высокой дозы P_2O_5 (0,6 г на сосуд) разница в выносе фосфора с урожаем растений по нейтрализованному и обычному сульфату аммония была весьма значительной, хотя разница в величине урожая в этих вариантах заметно сгладилась.

Применение физиологически кислых аммиачных удобрений в условиях кислых почв, как уже отмечалось выше, активирует полуторные окислы, которые, вступая в реакцию с растворимыми фосфатами, образуют труднорастворимые и малодоступные растениям соединения фосфатов полуторных окислов. Известкование физиологически кислых аммиачных удобрений нейтрализует их потенциальную кислотность и тем самым устраняет причины, обусловливающие повышенную фиксацию растворимых фосфатов при применении физиологически кислых аммиачных удобрений. Следовательно, известкование физиологически кислых аммиачных удобрений в случае применения их на кислых почвах должно иметь большое значение для более экономного и рационального использования сопутствующих фосфорных удобрений.

Выводы

1. В вегетационных опытах (1934—1938 гг.) установлено, что нейтрализация потенциальной кислотности физиологически кислых удобрений (сульфата аммония, хлористого аммония, нитрата аммония и т. д.) путем смешения их с эквивалентным количеством $CaCO_3$ повышает их эффективность при применении на кислых почвах *.

2. Отрицательное влияние физиологической (и биологической) кислотности удобрений в условиях кислых почв наиболее резко сказывается при пониженных и умеренных дозах сопутствующих фосфорных удобрений. На фоне высоких доз P_2O_5 вредное действие физиологической кислотности аммиаксодержащих удобрений в значительной степени уменьшается.

3. При внесении на кислых почвах физиологически кислых азотных удобрений коэффициент использования растворимых фосфатов значительно понижается. В этих условиях нейтрализация потенциальной кислотности физиологически кислых форм азота путем смешения их с эквивалентным количеством $CaCO_3$ позволяет более экономно и рационально использовать P_2O_5 сопутствующих фосфорных удобрений.

В условиях вегетационных опытов, проведенных на подзолистом суглинке ДОП, процент P_2O_5 в растениях и особенно общий вынос P_2O_5 с урожаем растений по нейтрализованному сульфату аммония был значительно выше, чем по обычному, не нейтрализованному, сульфату аммония.

ЛИТЕРАТУРА

1. Действие минеральных удобрений при длительном применении. Сборник работ опытных полей НИУИФ.
2. Russel E. I. Landw. Jahrb., 1937.
3. Merkle F. G. Soil Science, 38, 1937.
4. Nehring K. Zeitschr. f. Pflanz. Dung, Rodenkunde, 1930.
5. Оболенская Л. И. Кальциево-аммиачная селитра. «Новое в удобрении», вып. 1, 1933.
6. Турчин Ф. В. Об известковании аммиачных удобрений. «Химическая промышленность», XV, 1938.
7. Турчин Ф. В. О природе действия удобрений, 1936

---

* По Pierre (Ind. Eng. Chem. Anal, 1933), для нейтрацизации потенциальной кислотности физиологически кислых азотных удобрений на 1 весовую часть азотного удобрения требуется такое количество весовых частей $CaCO_3$: сульфата аммония — 1,13, нитрата аммония — 0,63, сульфонитрата аммония — 0,96.

ВЛИЯНИЕ КОНДИЦИОНИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА КАЧЕСТВО АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ *

Аммиачная селитра является высокоэффективным концентрированным удобрением. Однако повышенная гигроскопичность и слеживаемость аммиачной селитры причиняет ряд неудобств при ее хранении и подготовке к внесению в почву. Слежавшуюся аммиачную селитру приходится тем или иным способом измельчать, что требует значительных затрат труда в напряженный период посевных работ.

В последние годы в нашей азотной промышленности для улучшения физических свойств аммиачной селитры применяются специальные кондиционирующие добавки. Влияние этих добавок на физические свойства аммиачной селитры изучалось в опытах, проводившихся на Долгопрудной агрохимической опытной станции (ДАОС) НИУИФ в условиях климата центральных районов Союза и на Граковском опытном поле НИУИФ в условиях климата юго-восточной части УССР **. Всего было испытано 90 партий аммиачной селитры, полученных от различных заводов. Испытаниям подвергались как рядовые производственные партии аммиачной селитры, так и специально приготовленные опытные партии, различающиеся по характеру и процентному содержанию кондиционирующих добавок.

Продолжительность хранения отдельных партий аммиачной селитры в этих опытах колебалась от 6 до 14 месяцев. Мешки с аммиачной селитрой укладывались в штабеля по восьми ярусов. Для исследования состояния аммиачной селитры в соответствующие сроки из каждой заложенной на хранение партии отбирались мешки из средних ярусов штабеля (обычно из 4-го яруса, считая сверху). В отобранных для исследования мешках определялись влажность продукта и степень его слеживаемости и рассеиваемости.

Влажность аммиачной селитры определялась путем нагревания взвешенной пробы в открытом стеклянном бюксе сначала при 80°, а затем в течение 6—8 часов при 100° до постоянного веса. Следует отметить, что после нагревания влажной селитры в течение 2 часов при 100°, как это рекомендуется стандартом, в пробе остается значительное количество влаги из-за образования на поверхности селитры сплошной корки, препятствующей испарению.

Степень слеживаемости аммиачной селитры устанавливалась по содержанию во взятых для испытания мешках сыпучей

---

* Статья опубликована в журнале «Химическая промышленность» № 2, 1955.

** В проведении опытов на Граковском опытном поле НИУИФ принимали участие старший научный сотрудник С. М. Гуревич и Н. И. Катрич.

фракции и по количеству времени, затраченного на дробление слежавшейся части селитры. Для этого продукт высыпался из мешка на фанерный лист, сыпучая фракция отсеивалась и взвешивалась, слежавшаяся же часть селитры (комки или глыбы) измельчалась деревянной толокушей весом 7 кг. Затем раздробленная селитра просеивалась на грохоте с отверстиями диаметром 7 мм. Оставшаяся на грохоте селитра дробилась вторично и вновь просеивалась. Все операции по измельчению селитры производились одним и тем же рабочим, и время, затраченное на дробление селитры, точно учитывалось.

Рассеваемость селитры определялась на стенде и в поле на сеялках — на разбросной сеялке с пальчатым выбрасывающим аппаратом типа «Вестфалия» и на комбинированной рядовой сеялке СК-10.

В результате проведенных наблюдений установлено, что слеживаемость аммиачной селитры резко понижается при добавке к ней разложенной в азотной кислоте фосфоритной (РФМ) или апатитовой муки (РАП) в количестве, соответствующем содержанию 0,5—1,0% P_2O_5 в готовом удобрении, или при добавке разложенного в азотной кислоте доломита или мела из расчета 0,2—1,5% CaO или CaO + MgO в готовом удобрении.

Аммиачная селитра без кондиционирующих добавок уже в момент прибытия к месту хранения представляла собой сильно слежавшуюся сплошную глыбу, дробление которой требовало значительных усилий и времени.

Аммиачная селитра с указанными добавками даже в условиях длительного ее хранения (12—14 месяцев) или совершенно не слеживалась, или слабо слеживалась в сравнительно рыхлые, легко измельчаемые комки.

Из приведенных в таблицах 1 и 2 данных видно, что добавки разложенной в азотной кислоте фосфоритной муки, апатитовой муки или доломита оказывают примерно одинаковое влияние на слеживаемость аммиачной селитры: применение любой из этих добавок или полностью предотвращает слеживаемость аммиачной селитры, или резко ее уменьшает. Из данных таблицы 1 также следует, что охлажденная аммиачная селитра и без кондиционирующих добавок сравнительно слабо слеживается при хранении.

Механизм действия добавок разложенного в азотной кислоте доломита, внесенного в аммиачную селитру в процессе ее получения, состоит, по-видимому, в равномерном распределении в массе готового продукта частиц нитрата кальция или магния, что препятствует сращиванию кристаллов аммиачной селитры при ее хранении. При добавке РФМ или РАП, кроме того, происходит обволакивание аммиачной селитры пленками свежеосажденного трикальцийфосфата, что также препятствует слеживанию селитры.

Таблица 1

Влияние кондиционирующих добавок на слеживаемость аммиачной селитры при хранении ее на складе ДАОС НИУИФ

Дата наблюдения	Кондиционирующие добавки	Состояние селитры в момент прибытия на ДАОС	Состояние селитры при хранении		
			срок хранения, мес.	сыпучая фракция, %	время, затраченное на дробление*, час.-мин.
	Гранулированная аммиачная селитра				
1951 г.	Без добавок	Сильно слежалась	6	0	6—45
12/V	РФМ (0,96% P_2O_5)	Сухая сыпучая	6	80	0—45
	CaO (1,58%)	„ „	6	60	0—47
2/IX	Без добавок	Сильно слежалась	12	0	7—55
	РФМ (0,96% P_2O_5)	Сухая сыпучая	12	80	0—50
	CaO (1,58 %)	„ „	12	80	0—25
1952 г. 5/VIII	РАП (0,99% P_2O_5)	„ „	3	85	0—22
1953 г. 15/IV	То же	„ „	12	50	0—25
24/IX	РАП (0,9% P_2O_5)	„ „	4	85	0—20
	CaO + MgO (0,39%)	„ „	5	85	0—12
	Чешуйчатая аммиачная селитра				
15/IV	Без добавок	Сильно слежалась	14	0	7—55
	CaO + MgO (0,4%)	Сухая сыпучая	14	90	0—25
24/IX	Без добавок	Сильно слежалась	5	0	4—10
	CaO + MgO (0,8%)	Сухая сыпучая	5	90	0—25
	CaO + MgO (0,48%)	„ „	5	50	1—10
	Чешуйчатая охлажденная аммиачная селитра				
15/IV	Без добавок	Сухая, слабо слежалась	7	15	1—45
24/IX	„ „	Сухая, рассыпчатая	4	50	1—10

* Одним рабочим на 1 т селитры.

Введение в состав аммиачной селитры указанных добавок не изменяет ее другого отрицательного свойства — гигроскопичности. Однако добавка разложенной апатитовой или фосфоритной муки повышает влагоемкость аммиачной селитры, поэтому при одном и том же процентном содержании влаги аммиачная селитра с добавками РАП или РФМ будет казаться на ощупь более сухой чем без добавок или с добавками разложенного доломита или мела.

Следует указать, что приведенные в таблице 3 данные, характеризующие степень отсыреваемости аммиачной селитры, получены в условиях крайне влажного и одновременно теплого летне-осеннего периода, в течение которого средняя темпера-

Таблица 2

Влияние кондиционирующих добавок на слеживаемость аммиачной селитры при хранении ее на складе Граковского опытного поля НИУИФ

Дата наблюдения	Кондиционирующие добавки	Состояние селитры в момент прибытия на Граковское опытное поле	Состояние селитры при хранении		
			срок хранения, мес.	сыпучая фракция, %	время, затраченное на дробление*, час.-мин.
	Гранулированная аммиачная селитра				
1951 г. 19/IX	Без добавок	Сильно слежалась	6	0	6--30
	РФМ (0,96% P_2O_5)	Сухая сыпучая	6	65	0—48
	CaO (1,58%)	„ „	6	95	0—24
1952 г. 12/IX	РАП (0,99% P_2O_5)	„ „	6	85	0—18
1953 г. 12/IX	РАП (0,90 % P_2O_5)	„ „	6	50	1—06
	CaO + MgO (0,48%)	„ „	6	55	1—15
	Чешуйчатая аммиачная селитра				
1952 г. 12/IX	Без добавок	Сильно слежалась	6	0	8—00
	CaO + MgO (0,4%)	Сухая сыпучая	6	100	0—00
	CaO + MgO (0,5%)	„ „	6	38	0—58

* Одним рабочим на 1 т селитры.

тура воздуха была 13,7°С, средняя влажность 74,5% и количество осадков составило 528,3 мм.

В этих весьма жестких для хранения условиях гранулированная аммиачная селитра со сферической формой гранул сохранилась в общем значительно лучше, чем чешуйчатая селитра, а гранулированная аммиачная селитра с добавками РАП или РФМ отсыревала слабее, чем с добавками CaO и MgO. При этом оказалось, что при большой добавке РАП (0,9% P_2O_5) селитра лучше сохраняется, меньше отсыревает, чем при пониженной дозе этой добавки (0,47%). Увеличение же дозировки разложенного доломита с 0,48 до 0,82% CaO + + MgO, наоборот, повышает гигроскопичность аммиачной селитры. Применение охлаждения при получении аммиачной селитры оказывает благоприятное влияние на ее сохранность: охлажденная селитра слабее отсыревала и содержание в ней влаги было наименьшим в сравнении со всеми исследовавшимися партиями.

В условиях более сухого климата Граковского опытного поля (средняя влажность воздуха за тот же период 68,3%, средняя температура 15,7°С и количество осадков 240,7 мм) все партии аммиачной селитры значительно слабее отсыревали, чем в опытах на ДАОС. Но и здесь гранулированная селитра

Таблица 3

Содержание влаги в аммиачной селитре и визуальное определение степени ее отсыреваемости при длительном хранении (6—12 мес.) на складе ДАОС

Дата наблюдения	Кондиционирующие добавки	Влажность, %	Общее состояние селитры
	Гранулированная аммиачная селитра		
1951 г. 2/XI	Без добавок	2,78	Очень сырая, плотно слежавшаяся глыба
	РФМ (0,9% P_2O_5)	2,98	Слегка отсырела, рыхлые комья в смеси с сыпучей массой
	CaO + MgO (0,75%)	2,68	Влажная, рыхлые комья в смеси с сыпучей массой
1953 г. 5/VII	CaO + MgO (0,48%)	2,58	Сырая, мешки внутри сырые
	РАП (0,47% P_2O_5)	2,31	Слегка отсырела, мешки сухие
	РАП (0,90% P_2O_5)	2,10	То же
24/IX	CaO + MgO (0,48%)	3,29	Влажная, мешки влажные
	РАП (0,47% P_2O_5)	4,0	Влажная, мешки отсырели
	РАП (0,90% P_2O_5)	2,40	Отсырела
	Чешуйчатая аммиачная селитра		
5/VII	Без добавок	3,65	Влажная, сильно слежалась
	CaO + MgO (0,82%)	2,95	Влажная, мешки сырые
	CaO + MgO (0,48%)	2,19	Сырая, мешки сухие
24/IX	Без добавок	5,5	Мокрая, сильно слежалась, много вторично перекристаллизовавшихся кристаллов
	CaO + MgO (0,82%)	4,80	Мокрая, на дно мешков стекает рассол
	CaO + MgO (0,48%)	4,15	Мокрая
	Чешуйчатая охлажденная аммиачная селитра		
5/VII	Без добавок	1,57	Слегка отсырела
24/IX	„ „	1,95	Влажная

со сферической формой гранул меньше увлажнялась при хранении, чем чешуйчатая селитра (табл. 4).

Наблюдения над изменением влажности аммиачной селитры в разное время года показали, что в зимнее время гигроскопичность аммиачной селитры резко понижается.

В опытах Долгопрудной агрохимической опытной станции различные партии аммиачной селитры осенью имели очень высокую влажность. Влажность селитры в этих же партиях после их перезимовки, т. е. ранней весной следующего года, резко упала (табл. 5).

Нами были проведены лабораторные опыты, в которых изучалась интенсивность поглощения аммиачной селитрой влаги из насыщенного влагой воздуха при различных температурах. Навеска селитры 25 г в чашке помещалась в эксикатор над водой, после чего эксикатор ставился в термостат.

Как следует из данных таблицы 6, при температуре 3—13° происходит умеренное поглощение влаги аммиачной селитрой,

Таблица 4

Влажность аммиачной селитры после 6-месячного хранения на Граковском опытном поле

Вид аммиачной селитры	Кондиционирующие добавки	Влажность, %
Гранулированная	РАП (0,47% P_2O_5)	1,2
	РАП (0,90% P_2O_5)	1,3
	CaO + MgO (0,48%)	1,1
Чешуйчатая	CaO + MgO (0,62%)	2,7
	(0,40%)	3,3
	(0,06%)	1,7

Таблица 5

Влажность аммиачной селитры в различное время года, %

Вид аммиачной селитры	№ партии	Осень	Начало весны
Гранулированная	209	3,05	1,43
	276	2,84	1,90
	193	2,57	1,80
Чешуйчатая	52	3,17	1,27
	48	3,53	2,0

Таблица 6

Поглощение влаги аммиачной селитрой в % к ее весу при различных температурах и при 100%-ной влажности воздуха

Продолжительность опыта, час.	Гранулированная селитра при			Чешуйчатая селитра при		
	3°	13°	23°	3°	13°	23°
6	0,15	0,11	0,82	0,24	0,20	1,02
30	0,44	0,58	3,08	0,79	0,83	3,23
70	1,25	1,83	6,03	1,83	2,05	6,11
94	1,62	2,61	Рассол	2,27	2,93	Рассол

но уже при 23° интенсивность поглощения влаги резко возрастает и через сравнительно короткий промежуток времени (94 часа) продукт настолько сильно увлажняется, что в нем образуется рассол.

Испытание рассеваемости различных партий аммиачной селитры, как уже отмечалось, проводилось на стенде и в полевых условиях. Для этих целей обычно использовалась аммиачная селитра, хранившаяся на складе около 6 месяцев. При

этом неслеживающийся продукт без всякой предварительной подготовки засыпался в ящик сеялки, а слежавшаяся аммиачная селитра предварительно измельчалась и просеивалась через грохот. При испытании на стенде учитывали количество удобрения, высеваемого при числе оборотов ходового колеса сеялки, соответствующем $^1/_{50}$ части гектара. При испытании в полевых условиях учитывалось количество удобрения, высеваемого на площади 0,5 га. Опыты с рассеваемостью каждой партии повторялись 4 раза. В качестве заданной нормы высева в опытах с разбросной туковой сеялкой была принята доза аммиачной селитры 180 кг/га, а в опытах с комбинированной сеялкой — в 60 кг аммиачной селитры.

Испытание рассеиваемости различных партий аммиачной селитры на разбросной туковой сеялке типа «Вестфалия» показало, что ее конструкция позволяет сравнительно точно высевать удобрения, обладающие даже недостаточно удовлетворительной сыпучестью, благодаря возможности регулировать ширину высевающей щели. Результаты испытаний сведены в таблицу 7. В графе «Установка сеялки» показан номер зарубки, на которой закрепляется рычаг, регулирующий ширину высевающей щели. Величина порядкового номера зарубки находится в обратной зависимости от ширины высевающей щели: чем больше номер зарубки, тем меньше ширина высевающей щели и тем, следовательно, лучшей сыпучестью обладает удобрение.

Как мы видим, степень сыпучести аммиачной селитры в этих опытах зависела прежде всего от ее влажности. Наибольшей сыпучестью обладала гранулированная селитра с добавками РФМ, РАП и без добавок. Гранулированная и чешуйчатая селитра с добавками CaO и CaO + MgO, содержащая больший процент влаги, была менее сыпучей.

Несмотря на довольно значительное различие в степени сыпучести отдельных партий аммиачной селитры, все они при соответствующей установке сеялки высевались достаточно удовлетворительно. Отклонения от заданной нормы высева на стенде при работе на разбросной туковой сеялке для большей части испытанных партий не превышали 5—6%. Наименее точный высев на стенде был для селитры с повышенным содержанием добавок CaO и CaO + MgO, при котором отклонения от заданной нормы достигали 10—11%. В опытах с рассеваемостью селитры в полевых условиях точность высева была в общем выше, чем на стенде. Лучшая рассеваемость в поле обусловлена некоторым встряхиванием сеялки при ее движении по полю, что предотвращает образование пустот и сводов в удобрении, находящемся в ящике сеялки.

Гораздо большее значение имеет степень сыпучести аммиачной селитры при работе с комбинированной сеялкой. Проводившийся на ДАОС высев сильно отсыревшей и обладающей

Таблица 7

Результаты испытаний рассеваемости аммиачной селитры при разбросной туковой сеялке

Дата наблюдения	Кондиционирующие добавки	Влажность, %	На стенде		В поле	
			установка сеялки, № зарубки	отклонения *, %	установка сеялки, № зарубки	отклонения *, %
Гранулированная аммиачная селитра						
1951 г. 12/V	Без добавок	1,25	8	6	7	2
	РФМ (0,9% P_2O_5)	1,47	10	5	10	3
	CaO (1,58%)	2,44	5	10	4	4
	CaO + MgO (0,79%)	2,60	4	11	4	4
1953 г. 12/IX	РАП (0,9% P_2O_5)	1,52	6	1	6	7
	CaO + MgO (0,4%)	2,46	2	3	2	3
Чешуйчатая аммиачная селитра						
1951 г. 12/V	Без добавок	2,75	5	3	6	0
	CaO + MgO (0,48%)	3,08	1	5	1	2
1953 г. 12/IX	CaO + MgO (0,22%)	2,60	1	2	1	4

* Отклонение в высеве от заданной нормы, ±%.

поэтому слабой сыпучестью аммиачной селитры был сопряжен со значительными затруднениями. Селитра забивала тукопроводы сеялки, что вызывало необходимость частого их встряхивания и отрицательно сказывалось на равномерности внесения удобрения. В условиях более сухого климата на Граковском опытном поле почти все партии аммиачной селитры рассевались на комбинированной сеялке более или менее удовлетворительно, что видно из данных таблицы 8.

Таблица 8

Рассеваемость аммиачной селитры с добавкой CaO + MgO на комбинированной сеялке в полевых условиях Граковского опытного поля

Влажность, %	Высев, % от заданной нормы	Влажность, %	Высев, % от заданной нормы
Чешуйчатая аммиачная селитра		Гранулированная аммиачная селитра	
0,9	118	1,1	102
2,7	110	1,9	126
1,7	110	1,1	100
3,3	120 *	—	—

* Забивает тукопровод.

Все партии селитры (кроме 4-й, см. 4-ю строку табл. 8) хорошо рассевались. Некоторое превышение высева против за-

данной нормы в практических условиях может быть устранено предварительной установкой сеялки по результатам пробных высевов.

Рассеваемость различных партий аммиачной селитры изучалась также на Центральной станции механизации Института хлопководства под Ташкентом (НИХИ). Испытание производилось на туковысевающем аппарате тарельчатого типа (СУЗ), широко применяющемся в практике хлопковых районов Средней Азии. Кроме чистой аммиачной селитры, здесь испытывались еще и смеси аммиачной селитры с суперфосфатом, с соотношением исходных компонентов 1 : 1. Результаты испытаний приведены в таблице 9.

Таблица 9

Рассеваемость аммиачной селитры и ее смеси с суперфосфатом на тарельчатом туковысевающем аппарате (СУЗ) в условиях Центральной станции механизации НИХИ

Вид удобрения	Заданная норма высева, кг/га	Величина высевающей щели, мм	Отклонение в высеве от заданной нормы, %
Чешуйчатая аммиачная селитра с добавкой РФМ	50	6	2
	100	8	2
	150	12	0,6
Гранулированная аммиачная селитра с добавкой CaO + MgO	50	5	18
	100	7	1,0
	150	9	0,6
Смесь чешуйчатой аммиачной селитры с суперфосфатом (1 : 1)	150	12	5,5
	300	18	1,7
Смесь гранулированной аммиачной селитры с суперфосфатом (1 : 1)	150	11	2,6
	300	17	0,3

Здесь также величина щели высевающего аппарата в пределах одной и той же нормы высева характеризует сыпучесть удобрений: чем уже щель, тем лучше сыпучесть удобрений. Из приведенных данных видно, что гранулированная аммиачная селитра обладала более высокой сыпучестью, чем чешуйчатая, и что, несмотря на некоторое различие в сыпучести, как чистая селитра, так и ее смесь с суперфосфатом вполне удовлетворительно рассевались на тарельчатом туковысевающем аппарате.

Выводы

Введение в состав аммиачной селитры в процессе ее получения кондиционирующих добавок — разложенной в азотной кислоте фосфоритной или апатитовой муки (РФМ, РАП) из расчета около 1% P_2O_5 в готовом удобрении или разложенного в азотной кислоте мела или доломита из расчета 0,2—0,5%

CaO (или суммы CaO + MgO) в готовом удобрении резко улучшает качество аммиачной селитры.

Аммиачная селитра с этими добавками даже в условиях длительного ее хранения (около 1 года) или совершенно не слеживается, или слабо слеживается в сравнительно рыхлые комья, измельчение которых при подготовке селитры к внесению в почву, как правило, не сопряжено со значительной затратой труда. Введение в состав аммиачной селитры указанных добавок не устраняет ее гигроскопичности.

Проведенными опытами установлено, что применение добавок РФМ и РАП повышает водоудерживающую способность аммиачной селитры, в результате чего при одинаковом абсолютном содержании влаги селитра с добавками РФМ или РАП меньше отсыревает, чем селитра без добавок или с добавками разложенного мела или доломита.

Опыты по рассеваемости различных партий аммиачной селитры показали, что лучшей сыпучестью обладает аммиачная селитра со сферической формой гранул с добавками РАП или РФМ. Несколько меньшей сыпучестью обладала гранулированная селитра с добавкой разложенного доломита. Чешуйчатая аммиачная селитра с добавками разложенного доломита менее сыпуча, чем гранулированная селитра.

Несмотря на указанное различие в сыпучести, все испытанные партии аммиачной селитры достаточно удовлетворительно рассевались на разбросной туковой сеялке с пальчатым высевающим аппаратом и на тарельчатом высевающем аппарате типа СУЗ.

Рассеваемость аммиачной селитры на комбинированной сеялке зависит прежде всего от влажности селитры. Высев сильно отсыревшей селитры на комбинированной сеялке в условиях влажного лета на Долгопрудной агрохимической опытной станции был сопряжен со значительными затруднениями. В условиях сравнительно сухого климата на Граковском опытном поле почти все испытанные партии аммиачной селитры рассевались на комбинированной сеялке более или менее удовлетворительно.

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТКОВО-АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ В НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЛОСЕ СССР *

Многочисленными исследованиями, проведенными на Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ, установлено, что каждый килограмм азота аммиачной селитры создает в почве кислотность, равную 55—60 грамм-эквивалентам.

* Статья опубликована в журнале «Удобрение и урожай» № 11, 1956.

Для нейтрализации такой кислотности требуется 2,75—3,00 кг $CaCO_3$. Потенциальная кислотность наиболее кислого удобрения — сульфата аммония — примерно в 2 раза выше и составляет 120 грамм-эквивалентов на 1 кг азота, и для ее нейтрализации потребуется 6 кг $CaCO_3$.

Применение потенциально кислых форм азотных удобрений на подзолистых почвах приводит к возрастанию именно этой вредной обменной кислотности почвы и к увеличению содержания активного алюминия и марганца. В длительных полевых опытах на подзолистой суглинистой почве Долгопрудной агрохимической опытной станции испытывались различные формы азотных удобрений на кислом (суперфосфат + хлористый калий) и на щелочном (томасшлак + хлористый калий) фосфатно-калийных фонах. За 7 лет опыта в почву было внесено 345 кг/га азота и затем был произведен анализ почвы из различных вариантов этого опыта (табл. 1).

Таблица 1

Обменная кислотность (мг-экв), **активный алюминий** (Al) **и марганец** (Mn), **мг на 100 г почвы**

Форма азотных удобрений	Фон суперфосфат + + хлористый калий			Фон томасшлак + + хлористый калий		
	обменная кислотность	Al	Mn	обменная кислотность	Al	Mn
Без азота (фон РК)	1,60	12,9	4,1	0,7	6,0	2,2
Аммиачная селитра	2,01	16,3	5,3	1,13	9,4	3,7
Аммиачная селитра нейтрализованная (известково-аммиачная селитра $NH_4NO_3+CaCO_3 = 1:1$)	1,48	12,1	4,0	0,80	6,4	2,2
Сульфат аммония	2,49	20,5	7,8	1,56	12,0	4,2
Сульфат аммония нейтрализованный $(NH_4)_2SO_4 + CaCO_3 = 1:1$)	1,80	13,4	4,7	0,83	5,3	2,2
Кальциевая селитра	1,66	13,1	4,0	0,88	7,2	2,8

Таким образом, в результате внесения в течение семи лет опыта 345 кг азота в виде аммиачной селитры обменная кислотность почвы на обоих фосфатно-калийных фонах повысилась примерно на одну и ту же величину — 0,4 мг-экв., а содержание активного алюминия и марганца соответственно увеличилось на 3,5 и 1,5 мг в пересчете на 100 г почвы.

При внесении тех же доз сульфата аммония* обменная кислотность почвы повысилась на обоих фонах на 0,8—0,9 мг-экв., а содержание обменного алюминия и марганца соответственно возросло примерно на 7 и 3 мг.

* Внесение тех же доз азота в виде сульфата аммония увеличило обменную кислотность по сравнению с вариантом, в котором азот не вносили.

Применение нейтрализованных форм аммиачной селитры и сульфата аммония в этих же условиях не оказывало никакого отрицательного влияния на агрономические свойства почвы.

Влияние потенциальной (физиологической) кислотности аммиачных удобрений на их эффективность было предметом систематических исследований, проводившихся в условиях многолетних полевых опытов как у нас в СССР, так и за рубежом (Долгопрудная агрохимическая опытная станция и Люберецкое опытное поле НИУИФ, Соликамская опытная станция, опытные поля Ротамстеда в Англии, Пенсильванская опытная станция в США и др.). В результате этих работ установлено совершенно бесспорное положение, что физиологически кислые формы азотных удобрений при систематическом применении их на почвах, не насыщенных основаниями, дают значительно меньший эффект, чем физиологически нейтральные или щелочные формы азотных удобрений. Нейтрализованная или известково-аммиачная селитра, в состав которой входит 40—50% $CaCO_3$ и 50—60% NH_4NO_3, является удобрением, физиологически нейтральным, поэтому она должна иметь значительное преимущество перед обычной, физиологически кислой аммиачной селитрой при систематическом применении этих удобрений на кислых почвах.

Однако при внесении аммиачной селитры и даже более кислого удобрения — сульфата аммония — в небольших дозах в первые годы применения вредное влияние потенциальной кислотности этих удобрений, за редкими исключениями, не сказывается или относительно слабо сказывается на урожае растений. Это происходит по той причине, что аммиачная селитра и сульфат аммония в химическом отношении являются нейтральными солями и кислотность этих удобрений развивается в почве, с одной стороны, в меру неравномерного потребления растениями анионов и катионов этих солей и, с другой стороны, вследствие нитрификационного процесса, в результате которого содержащийся в удобрениях аммиачный азот окисляется в азотную кислоту. Оба эти процесса для своего завершения требуют известного времени. Поэтому в первый год внесения азотных удобрений влияние их потенциальной кислотности может совершенно не сказаться на их эффективности или сказаться лишь в слабой степени. Именно такой вывод был сделан на основании многочисленных опытов, проведенных в свое время в географической сети НИУИФ при однократном внесении удобрений. Поэтому данные одногодичных опытов, в которых и аммиачная и известково-аммиачная селитры были одинаково эффективными, по существу, не могут быть использованы.

Если при однократном применении удобрений потенциальная кислотность их не оказывает существенного влияния на урожай, то положение существенно меняется при длительном при-

менении удобрений. В этих условиях кислотность почвы непрерывно возрастает, и это прежде всего сказывается на более чувствительных к кислотности культурах, таких, как свекла, клевер, пшеница, а при дальнейшем систематическом применении отрицательное влияние кислотности удобрений проявляется и на менее чувствительных культурах, как картофель, овес и др. На опытных полях НИУИФ — Долгопрудном и Люберецком — в течение ряда лет проводятся опыты по изучению влияния нейтрализации потенциальной кислотности аммиачной селитры и сульфата аммония на эффективность этих удобрений.

На Долгопрудной агрохимической опытной станции опыты проводятся на подзолистой суглинистой почве в севообороте с таким чередованием культур: картофель, свекла кормовая, яровая пшеница с подсевом трав, травы, лен. В 1952 г. вместо льна в этом севообороте была посеяна горчица.

Распределение удобрений по отдельным культурам севооборота приводится в таблице 2.

Таблица 2

	Доза, кг/га		
	N	P_2O_5	K_2O
Картофель	45	60	60
Свекла	90	90	90
Яровая пшеница	45	60	45
Травы	0	0	0
Лен (горчица)	30	60	45
Всего за севооборот	210	270	240

Опыт проводился в двух сериях, различающихся между собой формой фонового фосфатного удобрения: фон суперфосфата и фон томасшлака, внесение которого вследствие наличия в этом удобрении значительного количества активной извести должно было отчасти нейтрализовать почвенную кислотность. В качестве отдельных форм азота испытывались кальциевая селитра, как удобрение физиологически щелочное, аммиачная селитра и сульфат аммония в чистом виде и эти же удобрения в нейтрализованном виде. Нейтрализация указанных удобрений производилась путем смешивания их перед внесением с эквивалентным количеством $CaCO_3$, рассчитанным на полную нейтрализацию потенциальной их кислотности: на единицу азота 3 части $CaCO_3$ для NH_4NO_3 и 5 частей $CaCO_3$ для $(NH_4)_2SO_4$.

Ниже излагаются результаты опытов по отдельным культурам севооборота.

Из приведенных данных следует, что нейтрализация потенциальной кислотности аммиачной селитры и сульфата аммония резко повышала эффективность этих удобрений при внесении их под свеклу (табл. 3).

Таблица 3

Кормовая свекла. Урожаи и прибавки от азота (ц/га) в среднем по ротациям севооборота

Вариант опыта	Фон — суперфосфат + + хлористый калий			Фон — томасшлак + + хлористый калий		
	1-я ротация	2-я ротация	3-я ротация	1-я ротация	2-я ротация	3-я ротация
Фон РК (без азота)	156	182	192	175	209	300
Фон РК + кальциевая селитра	+90	+141	+134	+95	+135	+106
Фон + аммиачная селитра	+71	+79	+53	+103	+115	+78
Фон + сульфат аммония	+70	+12	—24	+97	+92	—19
Фон + аммиачная селитра нейтрализованная	+86	+124	+114	+110	+126	+121
Фон + сульфат аммония нейтрализованный	+88	+137	+92	+92	+132	+132

Если прибавки урожая кормовой свеклы от аммиачной селитры принять за 100, то прибавки от нейтрализованной аммиачной селитры могут быть выражены следующими относительными величинами (табл. 4).

Таблица 4

Относительная эффективность аммиачной и нейтрализованной аммиачной селитры

	Ротация севооборота		
	1-я	2-я	3-я
Фон суперфосфата			
Аммиачная селитра	100	100	100
Нейтрализованная аммиачная селитра	123	159	215
Щелочной фон томасшлака			
Аммиачная селитра	100	100	100
Нейтрализованная аммиачная селитра	107	110	155

Сульфат аммония, потенциальная кислотность которого примерно в 2 раза сильнее, чем аммиачной селитры, без нейтрализации в 3-й ротации давал отрицательный результат.

Яровая пшеница. Вследствие повышенной чувствительности яровой пшеницы к кислотности среды прибавки от азота на фоне суперфосфата в среднем за 1-ю и 2-ю ротации были очень

низкими даже при внесении азота в форме кальциевой селитры или в виде нейтрализованной аммиачной селитры. Внесение обычной (ненейтрализованной) аммиачной селитры и сульфата аммония снижало урожай пшеницы против фона РК. На щелочном фосфатном фоне (томасшлак) прибавки от кальциевой селитры и нейтрализованных форм аммиачной селитры и сульфата аммония были примерно одинаковы. Обычная аммиачная селитра на этом фоне действовала слабее, а обычный (т. е. ненейтрализованный) сульфат аммония снижал урожай. Более показательными являются приводимые здесь данные, полученные в опытах 1950 г., когда нейтрализованные формы аммиачной селитры и сульфата аммония на обоих фонах давали достаточно хорошие прибавки урожая, а без нейтрализации эффективность этих удобрений резко падала (табл. 5).

Таблица 5

Результаты длительных опытов с яровой пшеницей на подзолистой суглинистой почве ДАОС

Вариант опыта	Урожай зерна и прибавки от азота, ц/га	
	фон — суперфосфат + хлористый калий	фон — томасшлак + хлористый калий
	1950 г., 2-я ротация	1950 г., 3-я ротация
Фон РК (без азота)	14,8	16,7
Фон РК + кальциевая селитра	+3,8	+4,4
Фон РК + аммиачная селитра	+0,1	+4,4
Фон РК + сульфат аммония	—1,3	+1,2
Фон РК + аммиачная селитра нейтрализованная	+2,2	+5,6
Фон РК + сульфат аммония нейтрализованный	+2,3	+5,5

Картофель характеризуется относительно слабой чувствительностью к кислотности почвы. Поэтому в 1-ю и даже во 2-ю ротацию севооборота обычная и нейтрализованная аммиачная селитра были примерно одинаково эффективны. Но при дальнейшем внесении удобрений к началу 3-й ротации отрицательное влияние кислотности удобрения начало сказываться уже и на этой культуре. В результате в 3-й ротации нейтрализованные виды аммиачной селитры и сульфата аммония имели значительное преимущество перед обычными (не нейтрализованными) видами этих удобрений (табл. 6).

Лен в условиях рассматриваемого опыта сравнительно слабо реагировал на внесение азотных удобрений и их формы, поэтому в 1952 г. во 2-й ротации вместо льна в севооборот была введена горчица как растение, требовательное к условиям азот-

Таблица 6

Урожай картофеля и прибавки от азота, ц/га

Фон — суперфосфат + хлористый калий		
	2-я ротация	3-я ротация
Фон РК	165	223
Фон РК + аммиачная селитра	+34	+49
Фон РК + сульфат аммония	+22	+28
Фон РК + аммиачная селитра нейтрализованная	+31	+59
Фон РК + сульфат аммония нейтрализованный	+38	+60

ного питания. В связи с закрытием опыта горчица не доводилась до созревания и была убрана на зеленую массу. Результаты приведены в таблице 7.

Таблица 7

Урожай зеленой массы горчицы и прибавки от азота, ц/га

Форма азотных удобрений	Фон — суперфосфат + хлористый калий	Фон — томасшлак + хлористый калий
Без азота	36	84
Прибавки от азота		
Кальциевая селитра	+43	+31
Аммиачная селитра	+12	—0,6
Сульфат аммония	Нет урожая; растения погибли	—24
Нейтрализованная аммиачная селитра	+58	+30
Нейтрализованный сульфат аммония	+29	+15

Таким образом, на тяжелых суглинистых подзолистых почвах отрицательное влияние потенциальной кислотности аммиачной селитры, а тем более сульфата аммония прежде всего проявляется на чувствительных к кислотности культурах. На менее чувствительных культурах, как картофель, лен, овес, рожь, вредное влияние кислотности удобрений сказывается только после сравнительно длительного их применения, когда кислотность почвы после многократного применения кислых форм удобрений настолько возрастает, что это начинает угнетать даже сравнительно устойчивые к кислотности растения.

На песчаных и легких супесчаных почвах, вследствие слабой буферности этих почв, отрицательное влияние потенциальной кислотности удобрений проявляется значительно быстрее и резче, чем на суглинистых почвах. В опытах на подзолистой супесчаной почве Люберецкого опытного поля НИУИФ вредное влияние потенциальной кислотности аммиачной селитры

резко проявилось на 3—4-й год ее применения даже под такое устойчивое к кислотности растение, как озимая рожь (табл. 8).

Таблица 8

Результаты длительных полевых опытов с озимой рожью на подзолистой супесчаной почве Люберецкого опытного поля НИУИФ

	Урожай и прибавка от азота, ц/га	
	кормовая свекла (2-й год внесения удобрений)	озимая рожь — зерно (4-й год внесения удобрений)
Фон РК	255	7,0
Прибавки от азота		
Аммиачная селитра	+70	+4,9
Сульфат аммония	+66	+2,8
Аммиачная селитра нейтрализованная	+148	+6,0
Сульфат аммония нейтрализованный	+132	+5,7

Преимущество нейтрализованных форм аммиачной селитры и сульфата аммония в этом опыте сказалось достаточно резко. Особенно высокий эффект на песчаных и супесчаных почвах оказывает нейтрализация потенциальной кислотности аммиачной селитры доломитом (табл. 9).

Таблица 9

Эффективность нейтрализованной доломитом аммиачной селитры на легкой супесчаной почве Люберецкого опытного поля

	Урожай, ц/га	
	просо (зерно)	картофель
Фон РК (без азота)	16,7	162
РК + аммиачная селитра	24,2	261
РК + нейтрализованная доломитом аммиачная селитра	28,9	291

Песчаные и супесчаные почвы характеризуются весьма низким содержанием усвояемого магния, а на этих почвах растения часто в той или иной степени испытывают недостаток магния в питании. Применение нейтрализованной доломитом аммиачной селитры снимает отрицательные последствия потенциальной кислотности аммиачной селитры и одновременно обеспечивает нормальное магниевое питание растений на легких, бедных магнием почвах.

Нейтрализация потенциальной кислотности аммиачной селитры, так же как и сульфата аммония, имеет вместе с тем существенное значение для использования растениями фосфорной кислоты сопутствующих удобрений. Дело в том, что увеличение подвижности алюминия и марганца в подзолистых почвах, происходящее в результате применения кислых форм азотных удобрений, вызывает, в свою очередь, повышенную ретроградацию P_2O_5 вследствие образования в этих условиях труднорастворимых фосфатов алюминия и марганца. Это видно из приведенных ниже данных вегетационного опыта, в котором изучалось действие различных форм азотных удобрений на подзолистой суглинистой почве на фоне низкой и высокой дозы фосфора (табл. 10).

Таблица 10

Урожай ячменя, г на сосуд

	Доза P_2O_5 0,15 г		Доза P_2O_5 0,5 г	
	общий	зерно	общий	зерно
Фон без азота	11,1	4,8	11,8	4,3
Кальциевая селитра	23,2	11,7	31,5	12,6
Аммиачная селитра	17,2	7,4	29,0	12,7
Сульфат аммония	11,4	4,4	25,5	10,6
Нейтрализованная аммиачная селитра	23,7	10,5	32,9	14,9
Нейтрализованный сульфат аммония	23,2	9,7	29,0	12,6

Таким образом, при внесении небольшой дозы P_2O_5 вредное влияние потенциальной кислотности удобрений сказывалось значительно сильнее, чем при внесении высокой дозы P_2O_5. В последнем случае избыток внесенной в почву фосфорной кислоты (в качестве источника ее в этом опыте применялся двойной суперфосфат) связывал подвижные формы алюминия и марганца в труднорастворимые фосфорные их соли.

При малой же дозе фосфора, внесенного на фоне кислых форм азотных удобрений, растения одновременно страдали и от недостатка фосфора и от наличия в почве повышенных количеств алюминия и марганца.

Приведенные здесь экспериментальные данные, равно как и общие представления о природе действия различных форм удобрений, позволяют утверждать, что не имеется никаких оснований для того, чтобы игнорировать значение потенциальной кислотности аммиачной селитры при использовании ее в достаточных масштабах в условиях подзолистых почв нечерноземной полосы.

Известно, что в штатах (США), имеющих кислые почвы, изданы даже специальные законы, обязывающие производите-

лей изготовлять физиологически кислые тукосмеси только в нейтрализованном виде.

Целесообразность нейтрализации потенциальной кислотности аммиачной селитры осознана и в других зарубежных странах.

В США, ГДР, ФРГ, Польше, Чехословакии, Англии и в других странах известково-аммиачная селитра применяется в весьма значительных количествах.

Неправильно утверждение, что за границей известково-аммиачная селитра выпускается вместо обычной чистой аммиачной селитры единственно из необоснованного страха перед взрывоопасностью последней.

В мировом ассортименте азотных удобрений чистая аммиачная селитра до второй мировой войны действительно почти отсутствовала, но еще во время второй мировой войны и особенно в послевоенные годы производство аммиачной селитры за рубежом непрерывно возрастает при одновременном росте известково-аммиачной селитры.

В США, например, где широко распространены как кислые подзолистые, так и нейтральные щелочные почвы, в больших количествах выпускается известково-аммиачная селитра (для кислых почв) и чистая аммиачная селитра (для некислых почв).

В 1952—1953 гг. производство чистой аммиачной селитры и известково-аммиачной селитры составило соответственно 22 и 13% общего мирового производства азотных удобрений.

На хорошо известкованных подзолистых почвах потенциальная кислотность удобрений не будет играть такой отрицательной роли, как на кислых, неизвесткованных почвах. В нашей стране имеются огромные территории кислых почв, а известкование их осуществляется сравнительно медленными темпами. Кроме того, применяемые в настоящее время дозы извести в размере около 3 т/га устраняют только обменную, наиболее вредную, кислотность почвы. При внесении кислых удобрений даже на известкованных почвах, в условиях дерново-подзолистого типа почвообразования, неизбежно будет происходить резкое усиление выщелачивания почвы, обеднение ее известью и повторное возникновение обменной кислотности. Это, в свою очередь, потребует ускоренного повторного известкования почвы. Поэтому в большинстве западноевропейских стран, даже на известкованных подзолистых почвах, для того чтобы предотвратить их ухудшение, применяют азотные удобрения в нейтральных и щелочных формах или вносят в сравнительно небольших дозах известь в севообороте.

Нам представляется, что вся система мероприятий по удобрениям в нашей стране должна проводиться с учетом не только непосредственной эффективности удобрений в год их внесения, но и с учетом всех тех изменений, которые происходят в почве

при длительном внесении удобрений. Во всяком случае следует применять такие формы удобрений, которые не ухудшали бы почву, а, наоборот, обеспечивали бы прогрессивное возрастание ее плодородия. Конечно, не обязательно в ассортименте удобрений для подзолистой зоны иметь именно известково-аммиачную селитру. Но ее может заменить не обычная аммиачная селитра, а такое физиологически щелочное удобрение, как кальциевая селитра, которая в ряде случаев является еще более эффективной, чем известково-аммиачная селитра.

Однако стоимость единицы азота в известково-аммиачной селитре обходится значительно дешевле, чем в кальциевой селитре, что, разумеется, также нельзя упускать из вида при решении вопроса об ассортименте удобрений для кислых почв нечерноземной полосы.

АГРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАЛИЙНО-АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ *

Калийно-аммиачная селитра приготовляется смешением нитрата аммония и хлористого калия. При взаимодействии нитрата аммония и хлористого калия в результате реакции обменного разложения получается калийная селитра и хлористый аммоний.

Опыты, проведенные в технологическом отделе НИУИФ, показали, что наиболее быстро реакция обменного разложения между NH_4NO_3 и KCl протекает при смешении этих веществ в плаве. При простом механическом смешении твердых солей реакция между ними протекает медленно. В соответствии с этим и физические свойства продуктов, полученных путем смешения твердых солей и путем смешения в плаве, различны. В первом случае готовая смесь обладает сильной слеживаемостью и гигроскопичностью. Слеживаемость такой смеси более или менее устраняется только после длительного ее хранения и последующего размола. Смесь же, полученная в плаве, наоборот, с первых дней после ее приготовления обладает достаточно удовлетворительными физическими свойствами.

Количественные соотношения смешиваемых веществ также оказывают большое влияние на физические свойства готового тука. Калийно-аммиачная селитра обладает удовлетворительными физическими свойствами только в том случае, если для ее приготовления взято не менее одного моля KCl на один моль NH_4NO_3. При большем относительно количестве NH_4NO_3 в исходной смеси готовый тук, как показывают опыты техно-

* Статья опубликована в журнале «Минеральные удобрения и инсектофунгисиды» № 4, 1935.

логического отдела НИУИФ, подвержен весьма сильному слеживанию.

При молярных соотношениях исходных компонентов теоретическое содержание N и K_2O в готовом туке должно было бы быть: N — 18,5%, K_2O — 30,4%. На самом деле содержание N и K_2O в калийно-аммиачной селитре вследствие наличия в ней небольшого количества примесей несколько ниже. В торговых заграничных образцах калийно-аммиачной селитры содержание питательных веществ примерно такое: около 16—17% N и 26—27% K_2O.

Так как калийно-аммиачная селитра является сложным азотно-калийным удобрением, то очевидно, что размещение этого тука должно производиться в тех районах и под те культуры, где одновременно нужны как азотные, так и калийные удобрения.

В условиях СССР это будут прежде всего районы подзолистых почв. Большинство сельскохозяйственных растений в этих районах отзывается положительно на азот и калий. Из технических культур азотно-калийные удобрения прежде всего будут направляться здесь под картофель, лен, коноплю.

На черноземных почвах (УССР, ЦЧО) и на карбонатных сероземах в хлопковых районах Средней Азии потребность в калии значительно менее выявлена, поэтому азотно-калийные удобрения для этих районов имеют в большинстве случаев второстепенное значение. Здесь прежде всего нужны азотно-фосфатные удобрения.

Таким образом, основными районами применения калийно-аммиачной селитры будут преимущественно районы подзолистых почв.

Особенностью калийно-аммиачной селитры является наличие в ней половины всего азота в форме хлористого аммония. Другая половина азота представлена в форме KNO_3.

Если KNO_3 является хорошим источником азота, то этого отнюдь нельзя сказать о хлористом аммонии. Проведенные в течение последних трех лет опыты в НИУИФ показывают, что хлористый аммоний вследствие наличия в нем большого количества хлора для многих культур, в том числе для табака, картофеля, льна, конопли и ряда овощных культур, не является желательным удобрением, более отрицательное действие содержащийся в нем хлор оказывает при внесении сравнительно высоких доз этого удобрения.

Так как в калийно-аммиачной селитре только половина азота связана с хлористым аммонием, то можно было предположить, что содержащийся в ней хлор не скажется так отрицательно на урожае, как это имеет место при внесении более богатых хлором удобрений (потазот, хлористый аммоний). Проведенные в НИУИФ еще в 1932 г. вегетационные опыты в значительной степени подтвердили это предположение.

Имеющиеся в иностранной литературе данные по изучению калийно-аммиачной селитры также в большинстве случаев дают удовлетворительную оценку этому туку. Так, например, в полевых опытах, проведенных Guyon во Франции (см. Ropport sur le foucteonment de L'Inst. de Rech. Argon. за 1931 г.), эффективность калийно-аммиачной селитры под картофель (растение, чувствительное к избытку хлора в удобрении) была равна эффективности стандартной комбинации удобрений.

В 1934 г. нами были проведены вегетационные опыты, которые должны были дать характеристику калийно-аммиачной селитры и выявить влияние содержащегося в ней хлора на действие азота.

Опыты с калийно-аммиачной селитрой были проведены с ячменем, льном и гречихой. Первое растение мало чувствительно к хлору, лен и гречиха реагируют на хлор отрицательно.

Опыты с ячменем проведены (М. М. Калашникова) на кислом подзолистом суглинке Долгопрудного опытного поля и на выщелоченном черноземе Шатиловской опытной станции. В этом опыте различные формы азота вносились на фоне PK $Ca(H_2PO_4)_2 + KCl$. Калийно-аммиачная селитра вносилась на фоне одного фосфора.

Следует отметить, что содержание калия в калийно-аммиачной селитре выше, чем в обычно принятых комбинациях удобрений. В зависимости от условий культуры и почвы соотношение $N : K_2O$ в удобрениях обычно колеблется в пределах 1 : 1 — 1 : 1,5; в составе калийно-аммиачной селитры соотношение $N : K_2O$ равно 1 : 1,7.

В данном опыте в качестве калийного фона мы брали дозу калия в 0,5 г K_2O на сосуд при такой же дозе азота. Таким образом, соотношение $N : K_2O$ в сравниваемых с калийно-аммиачной селитрой комбинациях было 1 : 1 (табл. 1).

Таблица 1

Ячмень. Урожай в г на сосуд

Удобрения	Подзолистый суглинок		Выщелоченный чернозем	
	общий урожай	урожай зерна	общий урожай	урожай зерна
Фон P	11,8	5,6	24,9	12,0
Фон PK	13,0	5,6	25,8	12,3
PK + нитрат аммония	24,9	11,9	30,1	13,6
PK + сульфат аммония	25,6	11,8	30,9	13,6
PK + натронная селитра	28,0	12,7	33,3	15,0
Фон P + калийно-аммиачная селитра	27,2	12,9	32,9	14,7
Фон P + нитрат аммония	23,4	11,1	31,5	13,6

Из этих данных видно, что калийно-аммиачная селитра на фоне Р на обеих почвах дала несколько повышенный урожай по сравнению с нитратом аммония или сульфатом аммония, внесенными на фоне Р и К. По-видимому, эту разницу в урожае обусловливает более высокое содержание калия в калийно-аммиачной селитре, так как различия в действии азота калийно-аммиачной селитры и азота смеси нитрата аммония с хлористым калием трудно ожидать.

Натронная селитра, являющаяся лучшим источником азота, для ячменя в условиях этого опыта действовала так же, как и калийно-аммиачная селитра.

Таким образом, имеющийся в калийно-аммиачной селитре избыток калия в ряде случаев на растениях, хорошо отзывающихся на калий, может дать дополнительный эффект.

Опыты со льном были проведены на кислой подзолистой почве Долгопрудного опытного поля. Доза N—0,42 г на сосуд. Доза P_2O_5 — 1,07 г на сосуд.

В этих опытах вместо продажной калийно-аммиачной селитры вносились в молярных соотношениях NH_4NO_3 и KCl, а также KNO_3 и NH_4Cl.

Эти комбинации сравнивались, с одной стороны, с комбинацией $NH_4Cl + K_2HPO_4 + (NH_4)_2HPO_4 + KCl$, содержащей в два раза больше хлора, и, с другой стороны, с комбинацией $(NH_4)_2HPO_4 + K_2SO_4$, совершенно не содержащей хлора.

Удобрения вносились двояким образом: а) все удобрения перед внесением растворялись и смешивались между собой и б) удобрения вносились в почву в твердом виде, каждое удобрение смешивалось с почвой отдельно.

Это различие в способах внесения должно было бы выявить значение объединения в калийно-аммиачной селитре ее компонентов ($KNO_3 + NH_4Cl$). Результаты опытов со льном приведены в таблице 2.

Самые низкие урожаи льна из всех хлорсодержащих комбинаций были получены при внесении всего азота в NH_4Cl. При этом особенно заметно снизился урожай зерна льна, что именно является характерным при вредном действии хлора. При внесении азота в $(NH_4)_2HPO_4$ и калия в форме KCl урожаи льна были несколько выше. Однако при смешении перед внесением растворов $(NH_4)_2HPO_4$ и KCl урожай зерна и в этой комбинации заметно отставал. При внесении комбинаций, составляющих калийно-аммиачную селитру, где доза хлора была в 2 раза меньше ($NH_4NO_3 + K_2SO_4$, $KNO_3 + NH_4Cl$), урожаи льна были примерно равными урожаям, полученным по удобрениям, не содержащим хлора [$(NH_4)_2HPO_4 + K_2SO_4$].

Опыты с гречихой были проведены на том же подзолистом суглинке Долгопрудного опытного поля.

Наличие в удобрении большого количества хлора (1,07 г Cl на сосуд) при аммиачной форме азота дало во всех случаях от-

Таблица 2

Лен. Урожай в г на сосуд

Удобрения	Количество хлора в удобрении	Каждое удобрение перемешивалось с почвой отдельно		Удобрения перед внесением смешивались в растворах	
		общий урожай	урожай зерна	общий урожай	урожай зерна
Без удобрения	—	12,1	2,4	—	—
$(NH_4)_2HPO_4$	0	25,5	5,9	—	—
$(NH_4)_2HPO_4 + KCl$	1,07	27,6	5,1	26,8	3,7
$K_2HPO_4 + NH_4Cl$	1,07	24,4	4,2	23,5	3,6
$Ca(H_2PO_4)_2 + NH_4NO_3 + KCl$	0,54	28,8	6,1	28,9	6,5
$Ca(H_2PO_4)_2 + {}^1/_2KNO_3 + 2NH_4Cl$	0,54	29,2	6,1	29,0	6,5
$Ca(H_2PO_4)_2 + (NH_4)_2HPO_4 + K_2SO_4$	0	31,0	5,9	28,5	6,4

Таблица 3

Гречиха. Урожай в г на сосуд

Удобрения	Содержание хлора в удобрении	Каждое удобрение перемешивалось с почвой отдельно		Удобрения перед внесением смешивались в растворах	
		общий урожай	урожай зерна	общий урожай	урожай зерна
Без удобрения	—	9,7	3,6	—	—
$Ca(H_2PO_4)_2$	0	20,7	3,6	—	—
$(NH_4)_2SO_4$	0	33,1	14,4	—	—
$(NH_4)_2HPO_4 + K_2SO_4$	0	38,3	16,7	40,3	17,5
$(NH_4)_2HPO_4 + KCl$	1,07	30,8	12,1	30,7	10,2
$(NH_4)_2HPO_4 + NH_4Cl$	1,07	35,5	14,3	32,5	12,8
$Ca(H_2PO_4)_2 + NH_4NO_3 + KCl$	0,54	41,6	19,2	38,3	15,5
$Ca(H_2PO_4)_2 + NH_4Cl + KNO_3$	0,54	42,3	19,1	38,6	16,8
$Ca(H_2PO_4)_2 + NaNO_3 + KCl$	1,07	42,7	19,8	42,0	17,6
$Ca(H_2PO_4)_2 + NaNO_3 + K_2SO_4$	0	42,6	19,1	43,3	18,9

рицательный эффект. Здесь, как и в опыте со льном, прежде всего заметно снизился урожай зерна.

При нитратном же источнике азота вредное влияние хлора на гречиху не было обнаружено. Отсутствие вредного действия высоких доз хлора на гречиху в условиях нитратного питания было констатировано и в других наших опытах. Этот факт указывает на то, что для гречихи, как и для некоторых других растений, вредное действие хлора связано с особенностями аммиачного питания растений. Не вдаваясь в подробное освещение этого вопроса, отметим, что этот факт весьма важен для комбинирования различных форм удобрений.

Что же касается комбинаций, составляющих калийно-аммиачную селитру ($NH_4NO_3 + KCl$, $KNO_3 + NH_4Cl$), то они почти не уступали комбинациям, не содержащим хлора. И только при внесении смеси удобрений из растворов комбинации $NH_4NO_3 + KCl$ и $KNO_3 + NH_4Cl$ дали некоторое, пожалуй мало доказуемое, понижение против комбинаций, не содержащих хлора.

Таким образом, сравнительно невысокое содержание хлора в калийно-аммиачной селитре и наличие половины азота в ней в нитратной форме допускают применение калийно-аммиачной селитры даже под чувствительные к хлору культуры.

Заключение

Калийно-аммиачная селитра, получаемая при смешении в молярных соотношениях NH_4NO_3 и KCl, может быть использована в качестве азотно-калийного удобрения в районах, характеризующихся одновременной потребностью в азоте и калии.

В пределах СССР одновременная потребность в азоте и калии наиболее резко выявлена в районах подзолистых почв; эти районы и являются наиболее подходящими для размещения калийно-аммиачной селитры.

Наличие хлора в калийно-аммиачной селитре (примерно 22—23% от веса тука) не оказывает заметного отрицательного влияния на действие содержащихся в ней питательных веществ, даже при внесении ее под растения с повышенной чувствительностью к хлору.

Отсутствие отрицательного действия хлора калийно-аммиачной селитры объясняется как сравнительно невысоким его содержанием в туке, так и наличием в последнем половины всего азота в нитратной форме. Это имеет существенное значение, так как проведенные у нас исследования показывают, что отрицательное действие хлора наиболее резко сказывается при комбинировании хлора с аммиачным азотом, при внесении же азота в нитратной форме вредное влияние хлора проявляется в гораздо меньшей степени.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЛОЖНЫХ УДОБРЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ НА ОСНОВЕ АЗОТНОКИСЛОТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФАТОВ*

Сроки и способы внесения различных видов удобрений на практике во многих случаях совпадают. Это обусловливает целесообразность широкого производства комбинированных удоб-

* Статья написана в соавторстве с В. И. Соколовой и опубликована в журнале «Удобрение и урожай», № 10, 1959.

рений, по своему химическому составу и физическим свойствам в наибольшей мере отвечающих требованиям сельского хозяйства. При отсутствии готовых комбинированных удобрений колхозники и работники совхозов вынуждены сами изготовлять нужные им смеси удобрений, что требует значительных затрат труда в напряженный период посевных работ и вместе с тем не всегда обеспечивает должное качество изготовляемых смесей.

Произведенные в последнее время в Научно-техническом комитете при Совете Министров СССР специальные расчеты показали, что в текущем семилетии не менее 30% от общего количества вырабатываемых туков целесообразно выпускать в виде комбинированных — сложных или готовых смешанных — удобрений. Производство комбинированных удобрений может быть осуществлено различными путями. В настоящее время в нашей стране, как и в ряде других стран, весьма большое значение приобретают методы азотнокислотной переработки фосфатов, когда азотная кислота одновременно используется и для превращения фосфатного вещества в усвояемую для растений форму и как источник азотного питания растений.

Состав сложных удобрений, получаемых при азотнокислотной переработке фосфатов, может значительно изменяться в зависимости от принятой технологической схемы. Если принята карбонатная схема, при которой избыток ионов кальция связывается углекислотой с образованием карбоната кальция, то вся усвояемая фосфорная кислота в готовом продукте представлена в цитратнорастворимой форме в виде дикальциевого фосфата (преципитата).

При связывании избытка ионов кальция серной кислотой (схема с добавлением серной кислоты) или при удалении из процесса части кальция в виде азотнокислой его соли путем вымораживания, в составе готового продукта усвояемая фосфорная кислота может быть представлена двумя формами — водорастворимым фосфатом аммония и цитратнорастворимым дикальциевым фосфатом. При этом доля водорастворимой P_2O_5, естественно, тем больше, чем больше введено в процесс серной кислоты или чем больше вымерожено из процесса нитрата кальция. Хорошая усвояемость растениями цитратнорастворимой P_2O_5 преципитата при основном, допосевном, внесении удобрений не может вызывать сомнений. Имеется огромное количество экспериментальных данных, которые показывают, что преципитат для всех почв СССР является не худшим источником P_2O_5, чем суперфосфат. На кислых почвах преципитат, как правило, дает даже более высокий эффект. Но преципитат, содержащийся в составе сложных удобрений, получаемых при азотнокислотных методах переработки фосфатов, по своему физическому состоянию отличается от обычного преципитата тем, что он агрегирован в сравнительно крупные частицы, так как сложные удобрения для придания им хороших физических

Таблица 1

Химический состав сложных удобрений, изучавшихся в опытах НИУИФ

Наименование и происхождение удобрения	Метод получения	Содержание P_2O_5, %			Содержание водорастворимого P_2O_5, % от усвояемой	%	
		водорастворимой	цитратнорастворимой	сумма водоцитратнорастворимой		N	K_2O
Нитрофоска № 83 отечественного производства	Схема с вымораживанием нитрата кальция	10,20	8,70	18,90	54,0	15,50	16,8
Нитрофоска № 78 отечественного производства	То же	6,30	8,50	14,80	42,5	16,56	14,40
Нитрофоска № 72 отечественного производства	„ „	3,54	10,45	13,99	25,8	16,10	17,40
Нитрофоска карбонатная 1958 г. отечественного производства	Карбонатная схема	0,07	7,94	8,01	0,9	14,80	11,30
Нитрофоска карбонатная 1957 г. отечественного производства	Схема с вымораживанием нитрата кальция	0,14	6,75	6,89	2,1	13,40	18,0
Нитрофоска 12-12-12 (ФРГ)	Схема с добавлением серной кислоты	0,90	10,8	11,70	7,7	11,70	20,40
Нитрофоска 10-8-18 (ФРГ)	Карбонатная схема	0	7,50	7,50	0	9,82	18,00
Нитрофос II (Франция, „РЕС“)	Схема с добавлением фосфорной кислоты	12,70	17,80	30,5	41,6	15,30	—
Нитрофос III (Франция, „РЕС“)	Схема с добавлением серной кислоты	2,50	14,00	16,50	15,2	15,30	—

Примечание. Все удобрения были получены в гранулированном виде, размер гранул от 1 до 5 мм.

свойств производят в гранулированном виде. Доступность же растениям не растворимых в воде фосфатов в значительной мере является функцией их поверхности, определяющей степень возможного контакта корневой системы растения с частицами удобрения. Так как удельная поверхность удобрений при их гранулировании сокращается, то теоретически это должно вызывать понижение доступности растениям цитратнорастворимой P_2O_5 гранулированных сложных удобрений. В отношении азота и калия нет никаких оснований думать, что доступность растениям легкорастворимых соединений этих элементов в сложных удобрениях будет другой, чем в соответствующих видах простых удобрений. Поэтому можно предполагать, что удобрительная

ценность сложных удобрений будет прежде всего зависеть от соотношения в них водорастворимой и цитратнорастворимой P_2O_5 и от их гранулометрического состава.

В течение последних трех лет (1956—1958) в НИУИФ изучалась эффективность сложных удобрений, полученных по различным схемам азотнокислотной переработки фосфатов. Исследовались как удобрения отечественного производства, так и полученные из других стран образцы сложных удобрений. В таблице 1 указан их состав.

Наиболее полное и систематическое изучение этих удобрений производилось в 1958 г. в строго контролируемых условиях вегетационного опыта на трех основных типах почв СССР: подзолистой суглинистой почве Долгопрудной опытной станции (Московская область), мощном черноземе Граковского опытного поля (Украина) и карбонатном сероземе из-под Ташкента (Средняя Азия).

Опыты проводились одновременно в трех сериях. В первой серии удобрения равномерно распределялись в почве. Во второй применялось локальное, или местное, внесение удобрений, что осуществлялось в вегетационных опытах путем размещения удобрений очагами в верхнем 5-сантиметровом слое почвы непосредственно под высеваемыми семенами. В третьей серии изучалось влияние величины гранул сложных удобрений на их эффективность.

Во всех опытах сложные удобрения применяли по содержанию в них усвояемой (сумма водо- и цитратнорастворимой) P_2O_5 на выравненном фоне NK.

Азот вносили в форме нитрата аммония, калий — в форме хлористого калия. Результаты этих опытов приведены в таблицах 2, 3 и 4.

Приведенные данные указывают прежде всего на далеко идущий параллелизм между содержанием водорастворимой P_2O_5 в гранулированных сложных удобрениях и их эффективностью. Гранулированная карбонатная нитрофоска, содержащая всю фосфорную кислоту в цитратнорастворимой форме, при всех способах внесения не могла служить сколько-нибудь удовлетворительным источником P_2O_5.

Порошковидная карбонатная нитрофоска при равномерном ее распределении по всей массе почвы оказалась не менее эффективным источником P_2O_5, чем суперфосфат или преципитат. Но при локальном размещении удобрения в почве эффективность P_2O_5 порошковидной карбонатной нитрофоски, так же как и преципитата, резко падает. Указанное снижение эффективности вполне закономерно, так как локализация удобрений в сравнительно небольшом объеме почвы сокращает их поверхность, подобно тому как это происходит при гранулировании удобрений. Поэтому вообще все виды удобрений, содержащие массу P_2O_5 в цитратнорастворимой форме независимо от их

Таблица 2

Эффективность P_2O_5 простых и сложных удобрений при равномерном распределении их в почве

Удобрения	Содержание водорастворимой P_2O_5, % от усвояемой	Прибавка урожая от использования P_2O_5, г/сосуд						относительные величины в среднем для всех опытов
		подзолистый суглинок		чернозем		серозем		
		овес		пшеница		пшеница		
		общий	зерно	общий	зерно	общий	зерно	
Суперфосфат гранулированный	95	6,2	5,1	31,6	13,0	12,3	7,0	100
Преципитат	0	7,8	6,0	31,2	13,8	14,0	7,6	110
Нитрофоска 83 отечественного производства	54	8,0	6,0	27,5	11,4	13,8	7,6	104
Нитрофоска 78 отечественного производства	42,5	5,2	6,0	28,4	12,1	11,2	5,6	97
Нитрофоска 72 отечественного производства	25,8	6,5	4,7	21,5	8,8	10,5	4,6	71
Нитрофоска карбонатная 1958 г. отечественного производства	0,9	—1,5	—1,4	—0,8	—0,2	5,4	2,4	12
Нитрофоска карбонатная 1957 г. отечественного производства	2,1	0,7	0,5	1,5	0,6	7,8	3,7	12
Нитрофоска 12-12-12 (ФРГ)	7,7	3,5	0,6	12,6	5,7	11,3	5,6	45
Нитрофоска карбонатная 10-8-18 (ФРГ)	0	0,3	0	10,6	4,3	7,3	4,1	30
Нитрофос II (Франция)	41,6	5,9	3,0	24,5	10,8	5,4	3,6	62
Нитрофос III (Франция)	15,2	3,2	1,1	18,7	8,2	5,6	3,2	43
Абсолютные урожаи контрольных вариантов (фон NK без фосфора)	—	56,1	28,7	27,0	11,1	31,0	10,4	—

Примечание. Доза P_2O_5 — 0,2 г на сосуд (7,5 кг почвы), доза N — 1,0 г, K_2O — 1,0 г на сосуд.

гранулометрического состава, непригодны для местного, локального, внесения в почву.

Нитрофоска 78 отечественного производства и нитрофос II производства французской фирмы «РЕС», содержащие около 40% от всей усвояемости P_2O_5 в водорастворимой форме, были в общем несколько худшими источниками P_2O_5 по сравнению с суперфосфатом или с нитрофоской 83. При равномерном распределении удобрений нитрофоска 72 была близка по эффективности к нитрофоске 83, но при локальном размещении удобрений нитрофоска 72, как и нитрофос II, действовала значительно слабее.

Еще худшими источниками P_2O_5 оказались гранулированные сложные удобрения, в составе которых водорастворимая P_2O_5

Таблица 3

Эффективность P_2O_5 простых и сложных удобрений при локальном их размещении в почве (доза P_2O_5 — 0,075 г на сосуд)

Удобрения	Содержание водорастворимой P_2O_5, % от усвояемой P_2O_5	Прибавка урожая от использования P_2O_5, г/сосуд				Относительные прибавки урожая зерна в среднем для обоих опытов
		подзолистый суглинок		чернозем		
		овес		пшеница		
		общий	зерно	общий	зерно	
Суперфосфат гранулированный	95	13,2	10,2	21,7	8,6	100
Преципитат	0	5,9	4,7	7,9	4,1	48
Нитрофоска 83 отечественного производства	54	11,9	9,5	12,2	5,8	81
Нитрофоска 72 отечественного производства	25,8	6,9	5,6	5,2	2,3	42
Нитрофоска карбонатная 1958 г. отечественного производства	0,9	0,7	1,0	—1,1	—0,7	5
Нитрофоска 12-12-12 (ФРГ)	7,7	4,6	4,6	0,9	1,2	29
Нитрофоска карбонатная 10-8-18 (ФРГ)	0	0,4	2,3	—1,2	0,1	12
Нитрофос II (Франция)	41,6	12,7	10,0	9,6	4,3	65
Нитрофос III (Франция)	15,2	8,3	6,8	6,2	3,1	51
Абсолютные урожаи контрольных вариантов (фон NK без фосфора)	—	17,7	4,5	27,8	12,3	—

была представлена в сравнительно небольшом количестве (нитрофоска 72 отечественного производства, нитрофоска 12-12-12 из ФРГ, нитрофос III фирмы «РЕС»).

Кроме учета урожаев, во всех опытах был произведен анализ растений на содержание в них фосфора. Полученные аналитические данные позволили определить степень использования P_2O_5 различных удобрений подопытными растениями. Эти данные (в среднем для всех испытывавшихся почв) представлены в таблице 5.

Степень использования P_2O_5 испытывавшихся сложных удобрений в общем соответствует их эффективности. Однако для карбонатной нитрофоски в большинстве опытов она была несколько более высокой, чем это можно было ожидать на основании данных об урожайности. Изучение поступления фосфора в растения на ранней стадии их развития показало, что в этот период P_2O_5 карбонатной нитрофоски практически не используется растениями.

Недостаточное фосфатное питание в молодом возрасте нарушает нормальный обмен веществ и понижает формообразовательную потенцию растений, вследствие чего количество зародышевых колосков и количество зачаточных завязей, кото-

Таблица 4

Влияние величины гранул сложных удобрений на эффективность их P_2O_5

Удобрения	Размер гранул, мм	Прибавка урожая от использования P_2O_5, г на сосуд						Относительные прибавки урожая зерна в среднем для всех опытов
		подзолистый суглинок		чернозем		серозем		
		овес		пшеница		пшеница		
		общий	зерно	общий	зерно	общий	зерно	
Равномерное распределение удобрений в почве (доза P_2O_5 — 0,2 г на сосуд)								
Суперфосфат	1—4	23,4	14,2	27,3	11,2	8,8	6,4	100
Нитрофоска карбонатная 1958 г. отечественного производства	Порошковидная	25,6	17,0	27,2	12,2	15,2	7,5	115
То же	1—2	11,9	6,6	5,8	2,4	3,9	2,7	36
„ „	2—4	6,9	3,9	2,8	2,5	2,8	3,0	34
Нитрофоска 83 отечественного производства	Порошковидная	24,4	16,0	28,0	11,2	17,0	7,9	112
То же	1—2	22,0	14,4	24,4	9,2	10,9	6,0	93
„ „	2—4	23,1	15,2	26,5	9,7	8,9	5,5	93
Абсолютный урожай контрольных вариантов (фон NK без фосфора)	—	15,8	5,1	42,2	16,9	46,1	13,0	—
Локальное размещение удобрений в почве (доза P_2O_5 — 0,075 г на сосуд)								
Суперфосфат	1—4	15,7	10,9	20,6	7,9	2,0	3,4	100
Нитрофоска карбонатная	Порошковидная	6,2	3,9	7,7	3,6	2,9	2,7	42
То же	1—2	3,0	1,6	5,5	3,0	—2	—0,4	18
„ „	2—4	1,4	—0,5	3,9	2,2	—1,3	0,7	9
Нитрофоска 83	Порошковидная	16,5	11,0	20,5	8,6	4,9	3,6	105
То же	1—2	11,9	7,5	17,3	6,5	2,8	2,4	74
„ „	2—4	10,5	6,7	16,3	6,1	1,5	2,6	72
Абсолютный урожай контрольных вариантов (фон NK без фосфора)	—	21,8	8,5	36,3	14,8	36,3	14,8	—

рые формируются в первые 2—3 недели жизни злаковых растений, сильно понижаются, что в конечном счете приводит к резкому снижению величины колоса и числа зерен в нем.

Значительное понижение формообразовательной потенции растений, вызванное недостатком фосфорного питания на ранней стадии их развития, ограничивает в дальнейшем возмож-

Таблица 5

Степень использования P_2O_5 различных удобрений подопытными растениями

Удобрения	Относительное использование растениями P_2O_5 из отдельных видов удобрений (средние величины, за 100 принято использование P_2O_5 гранулированного суперфосфата)			
	содержание водорастворимой P_2O_5, % от всей усвояемой P_2O_5	величина гранул, мм	равномерное распределение удобрения в почве	локальное (местное) внесение удобрения
Суперфосфат гранулированный	95	1—4	100	100
Преципитат	0	Порошковидный	116	47
Нитрофоска 83 отечественного производства	54	1—5	81	82
Нитрофоска 78 отечественного производства	42,5	1—5	66	—
Нитрофоска 72 отечественного производства	25,8	1—5	44	54
Нитрофоска карбонатная отечественного производства	0,9	1—5	26	14
Нитрофоска карбонатная отечественного производства	2,1	1—5	24	—
Нитрофоска 12-12-12 (ФРГ)	7,7	1—5	52	36
Нитрофоска 10-8-18 карбонатная (ФРГ)	0	1—5	28	17
Нитрофос II („РЕС“)	59	1—5	72	68
Нитрофос III („РЕС“)	15,2	1—5	50	50
Нитрофоска 83 отечественного производства	54	Порошковидная	104	106
То же	54	1—2	87	82
» »	54	2—4	87	84
Нитрофоска карбонатная отечественного производства	0,9	Порошковидная	125	43
То же	0,9	1—2	38	32
» »	0,9	2—4	40	22

ность продуктивного использования фосфатов, поступивших в растение в более поздние периоды, когда растение развивает достаточно мощную корневую систему. Поэтому при запоздалом поступлении фосфатов последние накапливаются в растении, но уже не могут в должной мере использоваться на построение полезной продукции урожая. В результате процентное содержание P_2O_5 в конечном урожае при использовании удобрений с недостаточной усвояемостью фосфатов иногда может быть даже выше, чем по хорошо усвояемым источникам фосфора (табл. 5).

Полевые опыты по изучению сложных удобрений, получаемых на основе азотнокислотной переработки фосфатов, проводились в 1958 г. на Раменском опытном поле НИУИФ. Иссле-

довалось влияние их на урожай картофеля и овса в условиях подзолистой суглинистой почвы.

В опытах с овсом внесение всех форм фосфора не дало эффекта. Результаты опыта с картофелем указаны в таблице 6.

Таблица 6

Влияние сложных удобрений, полученных на основе азотнокислотной переработки фосфатов, на урожай картофеля, ц/га

Удобрения	Сплошное равномерное внесение удобрений, доза P_2O_5 40 кг/га		Локальное внесение удобрений в гнезда при посадке картофеля из расчета 15 кг P_2O_5 на 1 га	
	урожай	прибавка от P_2O_5	урожай	прибавка от P_2O_5
Фон N 40 кг/га, K_2O_5 40 кг/га	148,4	—	153,6	—
Фон + суперфосфат гранулированный	182,5	+34,1	217,4	+63,3
Фон + нитрофоска 83, полученная по схеме с вымораживанием (54% водорастворимой от общей усвояемой P_2O_5)	196,2	+47,8	211,7	+58,1
Фон + нитрофоска карбонатная (вся усвояемая P_2O_5 представлена цитратнорастворимой формой)	149,3	+0,9	162,0	+8,4

В условиях полевых опытов при высоком действии P_2O_5 нитрофоски 83, равном действию P_2O_5 гранулированного суперфосфата, фосфор карбонатной нитрофоски практически не оказывал влияния на урожай картофеля. Таким образом, все полученные экспериментальные данные указывают на нецелесообразность применения, а следовательно, и производства гранулированной карбонатной нитрофоски, в составе которой вся фосфорная кислота представлена цитратнорастворимой формой.

Если в некоторых западных странах производится и используется гранулированная карбонатная нитрофоска, то, по всей вероятности, это можно объяснить лишь тем, что в результате длительного применения удобрений почвы там насыщены фосфором («зафосфачены») и потребность их в этом элементе проявляется сравнительно слабо. К тому же слабая усвояемость P_2O_5 карбонатной нитрофоски или других гранулированных сложных удобрений, содержащих P_2O_5 в цитратнорастворимой форме, перекрывается там высокой их дозировкой. Однако в последнее время и в зарубежных странах был опубликован ряд работ, свидетельствующих о нецелесообразности применения таких удобрений. Так, в журнале Американского общества почвоведов в 1956 г. опубликована работа Термана,

Энтони, Мортенсена и Лютца, в которой обобщены итоги исследований, проведенных TVA (американская фирма и исследовательский центр по проектированию и производству новых видов удобрений) совместно с семью опытными станциями. На основе многочисленных полевых опытов авторы пришли к выводу, что в сложном удобрении, в составе которого 93% от всей P_2O_5 представлено цитратнорастворимой и только 7% водорастворимой формой, увеличение размера гранул до 2—4 мм понижает урожайность пшеницы и овощных культур на 15—20%.

В вариантах, где в составе удобрений не менее 40% от общей P_2O_5 было представлено водорастворимой формой, размер гранул не оказывал сколько-нибудь заметного влияния на урожай.

В полевых опытах, проведенных в Англии на Ротамстедской опытной станции (Кук и др., 1958), урожайность сельскохозяйственных культур под действием гранулированной карбонатной нитрофоски была на 30% ниже, чем при использовании обычного набора удобрений, включающего в качестве фосфатного компонента суперфосфат или порошковидный преципитат. В опытах польских ученых (Бычковский и Остроменская) гранулированный нитрофосфат, содержащий P_2O_5 в цитратнорастворимой форме, был менее эффективен, чем порошковидный нитрофосфат.

Таким образом, те методы и схемы азотнокислотной переработки фосфатов, при применении которых вся или основная масса P_2O_5 будет получаться в цитратнорастворимой форме, не могут обеспечить получения полноценных гранулированных фосфорсодержащих сложных удобрений. В этих удобрениях азот и калий будут хорошо усваиваться растениями, но фосфор, по крайней мере в первый год внесения удобрений, окажется малодоступным растениям. Только при изготовлении таких удобрений не в гранулированном, а в порошковидном виде они могут эффективно использоваться для основного, допосевного, внесения, разумеется в том случае, если соотношение питательных элементов в них будет удовлетворительно, а их физические качества — достаточно хорошими.

На складе удобрений Долгопрудной агрохимической опытной станции уже около 6 месяцев хранится в штабелях упакованная в обычные крафтцеллюлозные мешки размолотая карбонатная нитрофоска. Проведенные наблюдения показывают, что за время хранения не произошло заметного ухудшения физических свойств этой нитрофоски: она и сейчас так же суха и рассыпчата, как и при поступлении на склад. Однако соотношение азота и фосфора в карбонатной нитрофоске, равное 1 : 0,7 или в лучшем случае 1 : 0,8, для ряда культур и почв СССР не является оптимальным. В большинстве случаев необходимо, чтобы в составе предпосевного основного удобрения,

для которого только и может быть использована эта нитрофоска, отношение фосфора к азоту было больше или во всяком случае не меньше 1.

Поэтому, если производство карбонатной нитрофоски достигнет значительных размеров, необходимо разработать соответствующие технологические приемы для выведения части азота из процесса с тем, чтобы получить удобрение с более уравновешенным соотношением азота и фосфора. Соотношение азота и фосфора в сложных удобрениях, полученных по другим схемам азотнокислотного метода переработки фосфатов (с вымораживанием, с добавлением серной или фосфорной кислоты), может варьировать в зависимости от степени вымораживания нитрата кальция или от количества добавляемой серной или фосфорной кислоты. В этом заключается преимущество названных схем перед карбонатной схемой в ее нынешнем виде, где на единицу азота при всех условиях приходится не более 0,8 единицы P_2O_5.

Выводы

1. Гранулированная нитрофоска, полученная по карбонатной схеме и содержащая всю усвояемую P_2O_5 в цитратнорастворимой форме, не является сколько-нибудь удовлетворительным источником фосфатного питания для растений. При всех способах внесения на всех изучавшихся в опытах почвах P_2O_5 карбонатной нитрофоски очень слабо усваивалась растениями и практически не давала прибавки урожая.

2. Измельченная карбонатная нитрофоска при сплошном внесении, обеспечивающем равномерное распределение ее в почве, является хорошим источником P_2O_5. По эффективности она примерно равна преципитату или суперфосфату. Однако для местного (рядкового, гнездового) внесения карбонатная нитрофоска непригодна даже при изготовлении ее в порошковидной форме.

3. Нитрофоска, полученная по схеме с вымораживанием избытка кальция, содержащая около 50% от общей P_2O_5 в водорастворимой форме, при основном ее внесении на всех почвах оказалась равноценной гранулированному суперфосфату. При местном внесении эта нитрофоска по усвояемости и эффективности P_2O_5 была близка к гранулированному суперфосфату на подзолистой суглинистой почве, а на мощном черноземе и сероземе она действовала несколько слабее.

4. Уменьшение содержания водорастворимой P_2O_5 в нитрофоске, полученной по схеме с применением вымораживания, до 25% отрицательно сказывалось на ее эффективности.

5. Сложные удобрения, полученные из Франции от фирмы «РЕС» или из ФРГ, приготовленные по схеме с добавлением серной кислоты и содержащие от 8 до 15% от общей P_2O_5

в водорастворимой форме, были примерно в 2—3 раза менее эффективными источниками P_2O_5, чем гранулированный суперфосфат.

В качестве общего вывода из всего изложенного следует, что производство гранулированной карбонатной нитрофоски вообще не является целесообразным.

Измельченная порошковидная нитрофоска при том непременном условии, что физические свойства ее будут вполне удовлетворительными, может быть использована для основного предпосевного внесения в различных районах СССР. При этом, однако, необходимо, чтобы в составе удобрения фосфора было столько же или больше, чем азота. Следует разработать такой способ получения порошковидной карбонатной нитрофоски, который обеспечивал бы в этом удобрении соотношение $N : P_2O_5 = 1 : 1$ или $1 : 1{,}5$.

Нитрофоска, содержащая около 50% P_2O_5 в водорастворимой форме, может быть эффективно использована для основного внесения на всех типах почв и для рядкового или гнездового внесения на почвах Нечерноземной зоны, а также, по-видимому, на деградированных и оподзоленных черноземах и на серых лесных почвах УССР и Центрально-Черноземной зоны.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ЖИДКИХ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ *

В Директивах XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 гг. имеется особое указание об обеспечении производства жидких азотных удобрений. Использование в сельском хозяйстве наряду с обычными «твердыми» удобрениями жидких азотных удобрений будет иметь существенное значение для экономики производства и применения азотных удобрений. При производстве жидких азотных удобрений отпадает необходимость в строительстве ряда перерабатывающих цехов (упарка, кристаллизация, грануляция, сушка и т. п.), что позволит снизить по крайней мере на 25% капиталовложения в строительство новых азотнотуковых заводов. А это значит, что производство азотных удобрений может быть увеличено на 25% и в более сжатые сроки. Кроме того, стоимость единицы азота в жидких азотных удобрениях обходится на 25—40% дешевле, чем в твердых удобрениях, как, например, в аммиачной селитре.

В качестве жидких азотных удобрений применяются жидкий аммиак и аммиакаты.

Жидкий аммиак (NH_3) является самым концентрированным азотным удобрением, содержащим 82% азота. Так как жидкий

* Статья опубликована в журнале «Удобрение и урожай» № 2, 1956.

аммиак обладает высокой упругостью паров (8,5 атм. при 20° С), то его хранят и транспортируют в стальных баллонах или в железнодорожных цистернах для сжиженных газов под давлением в 30—35 атм.

Аммиакаты представляют собой растворы аммиачной селитры или кальциевой селитры в жидком аммиаке. В состав аммиакатов обычно входит 17—27% жидкого аммиака, 55—67% аммиачной селитры или кальциевой и аммиачной селитры (в сумме) и 15—20% воды. В состав аммиакатов, изготовляемых в настоящее время в США, кроме аммиачной и кальциевой селитры, вводится также и мочевина. Содержание азота в аммиакатах в зависимости от их состава колеблется от 30 до 45%. Аммиакаты в отличие от жидкого аммиака характеризуются сравнительно слабой упругостью паров, всего около 1,0 атм. и ниже, поэтому они более удобны в обращении, чем жидкий аммиак, и их транспортируют и хранят в цистернах или контейнерах, рассчитанных на небольшое давление — в 1,5—2 атм.

Так как при соприкосновении жидкого аммиака и аммиакатов с воздухом происходит испарение аммиака, что приводит к потерям азота и одновременно может вызвать сильное раздражение слизистых оболочек у находящихся вблизи людей и животных, то все операции по внесению в почву жидкого аммиака и аммиакатов должны производиться таким образом, чтобы был исключен прямой контакт этих удобрений с воздухом. Поэтому жидкий аммиак и аммиакат вносят при помощи специальных машин, обеспечивающих заделку этих удобрений на достаточную глубину — не менее чем 10—12 см.

В почве аммиак адсорбируется почвенными коллоидами, поэтому каких-либо потерь азота из жидкого аммиака и аммиакатов при заделке их на указанную глубину совершенно не происходит.

Опыты по применению жидких азотных удобрений — аммиака и аммиакатов — впервые в мире были проведены в СССР в Научно-исследовательском институте удобрений и инсектофунгисидов в 1932—1933 гг. В то время были проведены опыты в строго контролируемых условиях вегетационного павильона с овсом и кукурузой на трех различных почвах — черноземе с Украины, карбонатном сероземе из Средней Азии и подзолистом суглинке Московской области. Полученные в этих опытах данные приведены в таблице 1.

Приведенные данные указывают на полную равноценность азота жидких удобрений (аммиака и аммиакатов) и азота аммиачной селитры.

Тогда же были проведены и полевые опыты, в которых изучалась эффективность аммиакатов под хлопчатник и картофель.

Таблица 1

Результаты вегетационных опытов с жидким аммиаком и аммиакатами (урожай, г/сосуд)

Удобрения	Подзолистый суглинок, овес		Чернозем, овес		Серозем, кукуруза
	зерно	общий	зерно	общий	общий
Контроль (фон РК без азота)	4,1	10,2	4,0	9,5	8,4
Аммиак	10,0	26,9	10,3	24,7	33,3
Аммиакат	10,8	26,0	10,4	23,7	32,8
Аммиачная селитра	9,5	23,6	9,4	22,7	33,2

В опыте с хлопчатником, проведенном на карбонатном сероземе опытного поля совхоза «Пахта-Арал» в Южном Казахстане, аммиакаты вносились с поливной водой перед посевом хлопчатника.

В опытах с картофелем, проводившихся на подзолистой суглинистой почве Долгопрудной агрохимической опытной станции и на подзолистой легкой супесчаной почве Люберецкого опытного поля НИУИФ под Москвой, аммиакаты посредством специального приспособления вносились в почву с заделкой на глубину 14—16 см. Доза азота в этих опытах была принята 60 кг/га. В полевых опытах применение аммиакатов давало такие же прибавки урожая, как и применение аммиачной селитры, что видно из следующих данных (табл. 2).

Таблица 2

Результаты полевых опытов с аммиакатом (урожай, ц/га)

	Хлопок-сырец	Картофель	
	совхоз „Пахта-Арал"	Люберецкое опытное поле	Долгопрудная агрохим. опытная станция
Без азота	24,2	194,5	138
Аммиачная селитра	30,1	279,5	150
Аммиакат	30,1	271,7	150

Таким образом, все опыты в полном соответствии с теоретическими представлениями показали, что аммиак и аммиакаты, если исключить возможность каких-либо потерь азота из этих удобрений при внесении их в почву, также усваиваются растениями и дают такой же эффект, как и обычные «твердые» азотные удобрения.

При поверхностном внесении аммиака и аммиакатов, естественно, происходят сильные потери азота, и такой способ внесения этого вида удобрений лишен всякого смысла.

Аммиак и аммиакаты при заделке их в почву на достаточную глубину не оказывают отрицательного влияния на всхожесть высеваемых семян. Но при местном, гнездовом, внесении аммиакаты и особенно жидкий аммиак резко понижают всхожесть семян, что видно из результатов опыта, в котором удобрения вносились в гнезда рядом с семенами (табл. 3).

Таблица 3

Влияние гнездового внесения удобрений на всхожесть свеклы

Удобрения	Процент семян сахарной свеклы, давших всходы
Без удобрений	100
Фосфорные и калийные удобрения (фон)	100
Фон + аммиак в гнезда	20
Фон + аммиакат в гнезда	55
Фон + аммиачная селитра в гнезда	86

Таким образом, жидкий аммиак и аммиакаты нельзя применять для внесения в гнезда, в лунки и в рядки рядом с высеваемыми семенами.

Жидкий аммиак и аммиакаты можно применять только в тех случаях, когда исключен непосредственный контакт этих удобрений с растениями.

Попадание аммиака или аммиакатов на листья и стебли растений вызывает ожоги, что отрицательно сказывается на всем дальнейшем развитии растений.

В полевых опытах на Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ, проведенных в 1954 г., аммиак при внесении его в основном, допосевном, удобрении с заделкой на глубину 16 см давал даже несколько лучший эффект, чем аммиачная селитра, но внесение 1%-ного раствора аммиака непосредственно на листья взрослых растений в качестве внекорневой подкормки оказывало отрицательное влияние на растения. В этом случае раствор аммиака, попадая на листья, вызывал на них сильные ожоги, хотя и не проникал внутрь листьев (табл. 4).

Под культуры с широкими междурядьями жидкие азотные удобрения можно вносить и в подкормку, но с обязательной заделкой на глубину не менее чем 10—12 см.

В опытах, проведенных на Долгопрудной агрохимической опытной станции в 1955 г., внесение аммиакатов в подкормку под капусту давало не худшие результаты, чем внесение аммиачной селитры. Это видно из данных таблицы 5.

Таблица 4

Результаты полевых опытов с сахарной свеклой

Вариант опыта	Урожай, ц/га		Азот удобрений в листьях через 24 часа после внесения внекорневой подкормки, мг N на 100 г листьев	
	корни	ботва	на поверхности листьев	внутри листьев
Контроль (фон РК)	199	75	—	—
Фон + 60 кг азота аммиака в основном удобрении	276	119	—	—
Фон + 60 кг азота в аммиачной селитре в основном удобрении	257	115	—	—
Фон + 20 кг азота 1%-ном растворе аммиака на листья во внекорневую подкормку	131	76	0	5,0
Фон + 20 кг азота в 3%-ном растворе аммиачной селитры на листья во внекорневую подкормку	204	11	16,7	103,0

Таблица 5

Результаты полевых опытов с капустой

	Урожай кочанов, ц/га
Контроль (фон РК без азота)	211
Фон + аммиачная селитра в основном удобрении до посева	294
Фон + аммиакат в основном удобрении до посева	280
Фон + $^2/_3$ нормы аммиачной селитры до посева, $^1/_3$ нормы в подкормку	286
Фон + $^2/_3$ нормы аммиаката до посева, $^1/_3$ нормы в подкормку	307

Во всех вариантах с внесением азота как в аммиакате, так и в аммиачной селитре получены примерно одни и те же результаты. Некоторые различия между отдельными вариантами не выходят за пределы случайных отклонений.

В 1956 г. в СССР будут проводиться широкие производственные опыты по применению жидкого аммиака и аммиакатов на больших площадях в колхозах и совхозах под посевы хлопчатника, сахарной свеклы, кукурузы, овощных и других культур. Жидкие азотные удобрения на поля колхозов будут вносить машинно-тракторные станции, располагающие необходимым для проведения этой работы квалифицированным агрономическим и техническим персоналом, а также соответствующим оборудованием для внесения жидких удобрений в почву.

Для быстрого освоения жидких удобрений в сельском хозяйстве большое значение будет иметь участие Министерства

химической промышленности, которое должно оказать техническую помощь в организации транспорта и хранения жидких азотных удобрений на местах потребления и в выполнении работ по внесению их в почву. Следует сказать, что существующие в настоящее время машины для внесения жидких азотных удобрений обладают тем недостатком, что с их помощью можно вносить только одни жидкие удобрения. Между тем в основном удобрении, как правило, кроме азота, нужно вносить еще и другие виды удобрений — фосфорные, калийные, изготовляемые в твердом виде. Да и при внесении в подкормку азотные удобрения во многих случаях вносятся одновременно с фосфорными или с фосфорными и калийными удобрениями.

Для использования всех удобрений в твердом виде на местах потребления изготовляется соответствующая тукосмесь, которая и вносится в один прием в почву. При наличии же азотных удобрений в жидком виде работы по внесению жидких азотных и твердых фосфорных или калийных удобрений приходится производить раздельно, что требует дополнительных затрат. Поэтому весьма важно, чтобы наши конструкторы разработали такой тип машины, посредством которого можно было бы одновременно вносить как жидкие азотные, так и твердые фосфорные и калийные удобрения.

С другой стороны, может быть целесообразным производство готовых сложных удобрений в жидком виде. В качестве таковых может служить, например, раствор диаммониевого фосфата, получаемого путем нейтрализации аммиаком фосфорной кислоты: 60%-ный раствор диаммониевого фосфата содержит около 13,8% азота (N) и 32% фосфора (P_2O_5). Такое соотношение азота к фосфору вполне подходит для основного удобрения сахарной свеклы, овощных и других культур. В тех случаях, когда требуется другое, более узкое, соотношение азота и фосфора, могли бы быть использованы концентрированные растворы — смеси диаммониевого фосфата и аммиачной селитры. Наконец, при добавлении калийных солей к этим растворам может быть получено тройное азотно-фосфорно-калийное удобрение.

В США за последние годы получают распространение полные жидкие удобрения, используемые под садовые и овощные культуры с различным соотношением N, P_2O_5, K_2O (20 : 20 : 20; 15 : 30 : 15; 20 : 10 : 20 и др.).

Для изготовления этих удобрений-растворов в качестве исходных компонентов используются фосфаты аммония, нитрат калия и мочевина.

В состав этих удобрений вводятся также микроэлементы и ростовые вещества. В ряде случаев для внекорневых подкормок применяют комбинированные растворы, содержащие как питательные для растений вещества, так и инсектофунгисиды.

Жидкий аммиак и аммиакаты могут применяться не только для непосредственного удобрения, но и для аммонизации супер-

фосфата. Опытами установлено, что при аммонизации суперфосфата аммиакатами получается продукт с содержанием 13—14% усвояемого фосфора (P_2O_5) и 7—8% азота (N), обладающий высокой удобрительной ценностью и превосходными физическими качествами. Производство аммонизированного аммиакатами суперфосфата является особенно желательным для свекловичной зоны, где применение его было бы хорошим источником азота и фосфора для основного внесения под сахарную свеклу и другие культуры.

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ТОРФО-МИНЕРАЛЬНЫХ АММИАЧНЫХ УДОБРЕНИЙ *

Торфо-минеральное аммиачное удобрение ТМАУ, рецептура производства которого разработана Институтом торфа, приготовляется путем смешения фрезерного торфа с суперфосфатом и хлористым калием и последующей аммонизации торфа аммиачной водой. На 1 т торфа идет 20 кг суперфосфата, 20 кг аммиачной воды и 10 кг калийных удобрений в пересчете на 40%-ную калийную соль.

Аммиачная вода вводится в торфяной навал и после этого торф собирается в караваны (бурты) по 1000 и более тонн в каждом. В этих буртах торф компостируется 2—3 месяца, в течение которых введенный в торф аммиачный азот под влиянием нитрифицирующих микроорганизмов частично превращается в нитратную форму азота. Готовое торфо-минеральное аммиачное удобрение по заданной технологии его изготовления за счет введенных минеральных удобрений должно иметь в своем составе 0,4% усвояемого минерального азота, 0,4% P_2O_5 и 0,4% K_2O. Однако фактическое содержание усвояемого азота в практике часто бывает более низким. Это обусловлено главным образом тем, что в процессе аммонизации торфа происходят потери аммиака вследствие его улетучивания. Кроме того, возможны потери азотистых соединений из торфяных буртов вследствие их выщелачивания атмосферными осадками. Но даже если допустить, что никаких потерь азота и других питательных для растений веществ из ТМАУ не будет происходить, тогда, чтобы внести среднюю обычно применяемую норму действующих элементов под такую, например, культуру, как картофель, — 60 кг азота, 60 кг P_2O_5 и 60 кг K_2O потребуется 15 т ТМАУ. Обычно рекомендуются такие дозы ТМАУ: под картофель и другие пропашные культуры (кукуруза, сахарная свекла) — 15—20 т, под овощные культуры — 30 т и под зерновые — 10 т.

Прежде всего необходимо установить, в какой же степени применение этих доз ТМАУ является более эффективным, чем

* Статья публикуется по рукописи 1961 г.

применение равного количества азота, фосфора и калия, вносимых в виде обычных минеральных удобрений в аммиачной селитре, суперфосфате и хлористом калии, без добавления их к торфу. Этот вопрос может быть решен проведением полевых опытов, в которых перед внесением ТМАУ производится химический анализ на содержание в нем усвояемых для растений форм азота, фосфора и калия и по результатам анализа определяется, какие количества этих питательных веществ нужно внести в виде обычных минеральных удобрений, эффективность которых сопоставляется с эффективностью ТМАУ. Такие опыты проводились в географической сети Всесоюзного института удобрений и агропочвоведения (ВИУА) и на Раменском опытном поле НИУИФ.

Результаты опытов за 1961 г. приведены в таблице 1.

Таблица 1

Опытные учреждения	Культуры	Урожай контроля, ц/га	Прибавка урожая от удобрений, ц/га		Дозы удобрений
			ТМАУ	минеральные удобрения (NPK)	
Центральная опытная станция ВИУА	Картофель	138,8	210,0	204,3	а) ТМАУ — 22 т б) NPK по эквиваленту (эквивалентное содержание усвояемых форм N, P_2O_5, K_2O в ТМАУ)
Судогодская опытная станция	То же	249,1	42,9	51,3	а) ТМАУ — 20 т б) NPK — по эквиваленту
Гродненская опытная станция	„ „	102,6	54,7	83,3	а) ТМАУ — 20 т б) NPK — по эквиваленту
Эстонский институт земледелия и мелиорации	„ „	229	42,0	52,0	а) ТМАУ — 15 т б) NPK — по эквиваленту
Научно-исследовательский институт овощного хозяйства	Томаты	190,6	73,4	54,4	а) ТМАУ — 30 т б) NPK — по эквиваленту
То же	Капуста	452	328	360	а) ТМАУ — 30 т б) NPK — по эквиваленту
Раменское опытное поле НИУИФ	Картофель	116,5	196,7	199,2	а) ТМАУ — 25 т б) NPK — по эквиваленту

Приведенные здесь данные показывают, что нет существенных различий в эффективности ТМАУ и минеральных удобрений, вносимых по расчету на одно и то же количество усвояемых форм N, P_2O_5 и K_2O (по эквиваленту). Некоторые отклонения в ту или другую сторону в отдельных опытах являются обычными для одногодичных полевых опытов.

Другого результата, собственно, трудно было и ожидать, так как торф является весьма инертным материалом. Правда, высказывались соображения, что при компостировании торфа с аммиачной водой происходит частичная мобилизация неусвояемого растениями органического азота торфа и поэтому ТМАУ якобы должен быть более эффективен, чем эквивалентная по содержанию NPK смесь минеральных удобрений. Применение изотопного метода дает принципиальную возможность проверки такого предположения. Если для аммонизации торфа использовать аммиачную воду, меченную тяжелым изотопом азота N^{15}, то в том случае, когда происходит мобилизация неусвояемого азота торфа, неизбежно в соответствии с правилом изотопного разведения должно происходить понижение концентрации тяжелых атомов N^{15} в составе усвояемого растениями азота. Проведенные в этом направлении исследования на Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ показали, что после 2-месячного кампостирования торфа с аммиачной водой, меченной изотопом N^{15}, концентрация атомов N^{15} в азотном составе растений, использовавших меченый азот этого компоста, была такой же, как и в том случае, когда в качестве источника азота вносилась меченная по N^{15} аммиачная вода без торфа (табл. 2).

Таблица 2

Источники азота	Усвоено растениями азота, мг N на сосуд	Избыток атомов N^{15}, мг	Атом % избытка N^{15}
ТМАУ, меченное по N^{15}	348	18,11	5,18
Аммиачная вода, меченная по N^{15} (эта аммиачная вода использовалась для изготовления ТМАУ)	350	17,89	5,15

В течение 2-месячного компостирования торфа с аммиачной водой, суперфосфатом и хлористым калием (в лабораторных условиях) никакой мобилизации азота торфа не происходило.

Таким образом, если применять то же количество минеральных удобрений, которое идет для приготовления ТМАУ, то можно получить такой же или близкий эффект, какой получается от ТМАУ, в котором те же минеральные удобрения разбавлены весьма большим количеством торфа.

При равенстве агротехнического эффекта, очевидно, решающее значение приобретает экономическая сторона того или иного приема использования удобрения. Известно, какое большое значение имеет фактор концентрации удобрений для экономики их использования. Чем менее концентрировано удобрение, тем выше будет расход на транспорт, хранение и внесение удобрений.

По расчетам лаборатории техноэкономических исследований НИУИФ, единица P_2O_5 в двойном суперфосфате с содержанием 48% P_2O_5 на заводе будет примерно на 10% дороже, чем в простом суперфосфате, содержащем 20,5% P_2O_5, но при транспорте по железной дороге на расстояние 100 км и при автотранспорте на 25 км с учетом расходов на тару и внесение (франко-почва) будет на 15% дешевле в сравнении с простым суперфосфатом.

Как видим, экономика использования в сельском хозяйстве простого суперфосфата характеризуется значительно худшими показателями в сравнении с двойным суперфосфатом, хотя в простом суперфосфате содержание P_2O_5 только в 2,4 раза меньше, чем в двойном.

Но в ТМАУ общее содержание суммы питательных для растений веществ составляет в лучшем случае всего 1,2% (0,4% N, 0,4% P_2O_5 и 0,4% K_2O), т. е. примерно в 25 раз меньше, чем в эквивалентной по содержанию азота, фосфора и калия комбинации применяемых в настоящее время минеральных удобрений — аммиачной селитры, простого суперфосфата и хлористого калия. Кроме того, заводская себестоимость единицы питательных веществ в ТМАУ намного выше, чем в минеральных удобрениях.

В следующей таблице приведена сравнительная стоимость в рублях франко-почва равного количества азота, фосфора и калия в ТМАУ и в минеральных удобрениях. Заводская стоимость ТМАУ на торфопредприятиях принята в 5 руб. за тонну (средняя цена для 1959—1960 гг.). Стоимость производства минеральных удобрений взята по прейскурантным ценам (табл. 3).

Таким образом, стоимость ТМАУ франко-почва примерно в 8 раз выше стоимости эквивалентного набора минеральных удобрений.

Примерно 60 кг азота, 60 кг P_2O_5 и 60 кг K_2O в виде минеральных удобрений, например на гектар картофеля, обеспечивает среднюю прибавку урожая картофеля в 6 т. Примерно такую же прибавку дает и внесение 15 т ТМАУ. В этом случае затраты на применение удобрений на тонну добавочного урожая составят: для минеральных удобрений — 2 руб. 47 коп., для ТМАУ — 21 руб. 10 коп.

При столь больших затратах на использование ТМАУ его применение могло бы дать такой же экономический эффект в сельском хозяйстве, как и применение равного эквивалентного количества минеральных удобрений только тогда, когда прибавка урожая от ТМАУ была бы примерно в 8 раз выше, чем от минеральных удобрений.

Вместе с тем организация широкого производства ТМАУ на торфопредприятиях требует больших капиталовложений. Так, для производства 20 млн. т ТМАУ потребуются капиталовложения в размере 250 млн. руб.; 20 млн. т ТМАУ по содержанию

Таблица 3

Сравнительная стоимость применения в сельском хозяйстве ТМАУ и эквивалентного по содержанию NPK количества минеральных удобрений

	В пересчете на 1 т азота (N) + 1 т P_2O_5 + + 1 т K_2O (в сумме)		В пересчете на среднюю дозу удобрения на 1 га (60 кг азота, 60 кг P_2O_5 и 60 кг K_2O)	
	минеральные удобрения — аммиачная селитра, простой суперфосфат, хлористый калий	ТМАУ	минеральные удобрения	ТМАУ
Вес удобрения, т	9,5	250,0	0,57	15,0
Себестоимость производства удобрений	230	1250	13,8	75,5
Стоимость транспорта (100 км по железной дороге и 25 км автотранспорт), погрузки и разгрузки удобрений	30,4	800	1,8	48,0
Стоимость внесения в почву	5,0	25 *	0,3	1,5 *
Стоимость удобрения в сельском хозяйстве франко-почва	265,4	2075	16,47	125,0

* Условно.

питательных для растений веществ эквивалентны 80 тыс. т азота, 80 тыс. т P_2O_5 и 80 тыс. т K_2O.

Согласно данным техникоэкономического отдела Государственного института азотной промышленности (ГИАП), капиталовложения на производство тонны азота в аммиачной селитре равны 250 руб., а капиталовложения на производство 1 т азота + + 1 т P_2O_5 и 1 т K_2O суммарно составляют примерно 550 руб.

Если указанные выше 250 млн. руб. направить не на организацию производства ТМАУ, а на организацию производства минеральных удобрений, то можно получить или 1 млн. т азота в виде аммиачной селитры, или в сумме 455 млн. т азота в аммиачной селитре + 455 млн. т P_2O_5 в суперфосфате и 455 млн. т K_2O в хлористом калии, т. е. в 5,7 раза больше питательных для растений веществ, чем в 20 млн. т ТМАУ. А так как эффективность ТМАУ в основном определяется количеством введенных в него минеральных удобрений, то это значит, что на средства, вложенные в производство минеральных удобрений, будет получено в 5,7 раза больше добавочной продукции урожая, чем на те же средства, вложенные в производство ТМАУ.

Нам представляется, что в настоящее время главным направлением в использовании торфа должно быть самое широкое развитие его применения в качестве подстилки и для компостирования с навозом. Это будет обеспечивать и хорошие зоогигиенические условия содержания животных и позволит резко увеличить производство высокоценного навозного удобрения.

ПРЕВРАЩЕНИЕ АЗОТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В РАСТЕНИЯХ И ПОЧВЕ

ВЛИЯНИЕ КАЛИЙНО-ФОСФАТНОГО ФОНА НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТЕНИЯМИ АММИАЧНЫХ И НИТРАТНЫХ ФОРМ АЗОТА*

Калий играет исключительно важную роль в использовании растениями аммиачного азота.

Как показали наши исследования [1], низкая степень обеспеченности калием в условиях аммиачного питания вызывает угнетение и даже гибель растений, в то время как при том же количестве калия в питательной среде, но в условиях нитратного питания, растения еще могут развиваться более или менее нормально. Большая потребность растений в калии при аммиачном питании обусловлена специфическим влиянием калия на усвоение растением аммиачного азота. При недостатке калия растение не в состоянии перерабатывать аммиак в азотистые органические соединения, в результате чего в растительных тканях накапливаются большие количества аммиака, оказывающие токсическое влияние на растения.

Таким образом, потребность растения в калии в значительной мере определяется формой источника азотного питания. Если, допустим, какая-то доза калия является вполне достаточной для нормального развития растения при нитратном питании, то эта же доза калия может оказаться недостаточной при внесении азота в аммиачной форме.

Этот вывод, к которому мы пришли на основании результатов проведенных у нас исследований, подтверждается также более поздними работами других исследователей. Особенно обстоятельные исследования по этому вопросу были проведены Arenz [2] в лаборатории Никласа.

О повышенной потребности в калии при внесении аммиачных удобрений говорят и результаты полевого опыта Р. И. Певзнер, проведенного в 1937 г. на Долгопрудной агрохимической станции с кормовой свеклой (Эккендорфская желтая) на малых делянках при восьмикратной повторности.

Чтобы крайние растения не могли воспользоваться добавочной площадью питания, опыт был проведен по методу окаймляющих рядков. Почва среднеподзоленная суглинистая, сравнительно хорошо окультуренная, заправленная органическим веществом. Схема и результаты опыта приведены в таблице 1.

---

* Статья опубликована в журнале «Химизация социалистического земледелия» № 9, 1940.

Таблица 1

Дозы K_2O (в форме KCl)	Урожай корней свеклы (ц/га) * на фоне			
	$Ca(NO_3)_2$ + суперфосфат		$(NH_4)_2SO_4$ + суперфосфат	
	ц/га	%	ц/га	%
0	663,3	100	602,1	100
30 кг/га K_2O	766,2	116	606,0	114
90 кг/га K_2O	802,6	121	827,5	137

* Без удобрений — 617,3 ц/га; дозы удобрений фона — N — 60, P_2O_5 — 90.

Как видно из таблицы, в отсутствие калия или при малой его дозе (30 кг) по кальциевой селитре был получен значительно больший урожай, чем по сульфату аммония. Увеличение дозы K_2O до 90 кг/га на фоне $(NH_4)_2SO_4$ вызвало резкий прирост урожая по сравнению с дозой K_2O 30 кг/га. На фоне $Ca(NO_3)_2$ увеличение дозы K_2O с 30 до 90 кг/га хотя и вызывало дальнейший прирост урожая, но этот прирост был значительно меньшим в сравнении с прибавкой урожая от той же дозы K_2O, полученной на фоне $(NH_4)_2SO_4$.

Если потребность растений в калии при аммиачном питании сказывается значительно сильнее, чем при нитратном, то потребность в фосфоре, как это уже было показано в наших работах [1], наоборот, резче проявляется в условиях нитратного питания растений. Отсюда следует, что оптимальное соотношение калия и фосфора к азоту в удобрении, помимо других факторов, будет также зависеть от формы применяемого азотного удобрения.

Проведенные нами исследования показали, что в условиях песчаных культур (в отсутствие свойственной всякой почве поглотительной способности) при аммиачном источнике азота избыточное содержание P_2O_5 в питательной среде не только не оказывает благоприятного влияния на развитие и урожай растений, а, наоборот, вызывает ухудшение роста растений.

Анализы растений показали, что при аммиачном питании в растениях содержится значительно больше P_2O_5, чем при нитратном питании *.

* Более интенсивное поступление P_2O_5 в растения в присутствии NH_3 было отмечено в работах Пиршле [3], Дикусара [4], а также в прежних работах автора [5].

Усиленное поступление P_2O_5 в растение при аммиачном источнике азота в наших опытах не находилось в какой-либо связи с физиологической кислотностью аммиачных солей, так как в этих опытах сульфат аммония вносился в смеси с эквивалентным количеством $CaCO_3$, благодаря чему реакция в сосудах с аммиачным азотом была близка к нейтральной.

При этом в случае повышенной дозы P_2O_5 (0,5 г на сосуд) около 90% всей P_2O_5, содержащейся в соломе «аммиачных растений», находилось в водорастворимой форме: это показывает, что основная масса накопленной в этих условиях P_2O_5 остается не использованной при синтезе органического вещества растений.

Чрезмерное накопление в растениях P_2O_5 в условиях аммиачного питания, как уже отмечалось, может оказать отрицательное влияние на рост растений.

В опытах, проведенных в условиях песчаных культур с овсом, доза P_2O_5 в 0,5 г на сосуд, давшая при нитратном питании хорошие результаты, при аммиачном питании вызвало сильное угнетение растений (табл. 2).

Таблица 2

Влияние различных доз P_2O_5 и K_2O на урожай овса в песчаных культурах и содержание в нем P_2O_5

Форма азота *	Дозы на сосуд, мг		Воздушносухое вещество овса в стадии колошения		Урожай сухого вещества овса в стадии полного созревания, г/сосуд	
	P_2O_5	K_2O	урожай, г/сосуд	% P_2O_5 в растении	общий	зерно
$Ca(NO_3)_2$	50	750	8,9	0,232	13,0	4,0
$(NH_4)_2SO_4$ + экв. $CaCO_3$	50	750	10,0	0,261	13,2	6,1
$Ca(NO_3)_2$	500	750	19,9	0,910	29,9	11,2
$(NH_4)_2SO_4$ + экв. $CaCO_3$	500	750	3,7	4,840	3,0	Нет
$Ca(NO_3)_2$	500	100	12,0	0,950	22,3	7,5
$(NH_4)_2SO_4$ + экв. $CaCO_3$	500	100	Растения погибли		—	—

* Доза азота — 0,6 г N на 4 кг песка в сосуде.

При низкой дозе P_2O_5 (50 мг на сосуд) и высокой дозе калия (750 мг K_2O) урожай овса по аммиачному азоту был несколько выше, чем по нитратному азоту. Содержание P_2O_5 в растениях в этом случае было сравнительно небольшое и примерно одинаковое как по нитратному, так и по аммиачному азоту.

При внесении 500 мг P_2O_5 на фоне высокой дозы калия (750 мг) урожай овса по нитратному азоту резко возрос, одновременно и содержание P_2O_5 в растениях повысилось до 0,91%. Но эта же доза P_2O_5 в условиях аммиачного питания вызвала сильное угнетение роста растений. Растения в этом случае спустя некоторое время после появления всходов начали желтеть и постепенно отмирали. Содержание P_2O_5 в растениях в этом варианте опыта достигло колоссальной величины — на сухое вещество растений содержалось 4,84% P_2O_5.

В этих же растениях было найдено большое количество аммиачного азота.

В 100 г сырого вещества свежеубранных растений, росших на аммиачном азоте при дозе P_2O_5 в 0,5 г, содержалось 120 мг N в форме NH_3.

Комбинация высокой дозы P_2O_5 (0,5 г) с низкой дозой K_2O (100 мг) при нитратном источнике азота была значительно эффективней, чем комбинация высокой дозы K_2O с низкой дозой P_2O_5. При низкой дозе K_2O и высокой дозе P_2O_5 в условиях аммиачного питания растения погибли сейчас же после появления их всходов.

Таким образом, резкий избыток P_2O_5 даже при наличии достаточного калийного питания при аммиачном источнике азота в условиях этого опыта вызвал угнетение роста растений, при этом процесс переработки аммиака в органические соединения при «пересыщении» растительной ткани фосфатами задерживался, вследствие чего в растениях накапливался в больших количествах аммиак.

Следует отметить, что отрицательное влияние избытка P_2O_5 при аммиачном источнике азота, по-видимому, проявляется с неодинаковой силой на различных видах растений. Так, в опытах с ячменем дозы P_2O_5 в 0,5—0,6 г на сосуд (при аммиачном азоте) не вызывали столь резкого ухудшения роста растений, как это имело место в опытах с овсом. Вместе с тем и процент P_2O_5 в ячмене в различных опытах на фоне указанных доз P_2O_5 при аммиачном питании не поднимался выше 2,5—3,0%, в то время как в овсе при внесении 0,5 г P_2O_5 на фоне аммиачного азота содержание P_2O_5 в растении достигало 5%. По-видимому, это различие обусловлено не одинаковой избирательной способностью растений в отношении P_2O_5. Овес более интенсивно поглощает P_2O_5 из питательной среды, накопление P_2O_5 в этом растении достигает больших размеров по сравнению с ячменем, поэтому и отрицательное влияние избытка P_2O_5 при аммиачном питании сказывается на овсе сильнее, чем на ячмене.

Увеличение дозы калия в известной степени ослабляет проявляющееся в условиях аммиачного питания отрицательное влияние избытка фосфата. Это можно видеть как из таблицы 2, так и из данных таблицы 3.

Повышение дозы K_2O с 0,6 до 1,5 г на сосуд при дозе P_2O_5 в 0,2 г заметно понизило содержание P_2O_5 в растениях, хотя на урожае ячменя увеличение дозы K_2O мало сказалось.

Повышение дозы P_2O_5 до 0,6 г на фоне 0,6 г K_2O вызвало падение урожая ячменя, в особенности зерна, и сильно повысило содержание P_2O_5 в соломе ячменя.

Увеличение дозы K_2O до 1,5 г на фоне 0,6 г P_2O_5 оказало положительное влияние на урожай и вызвало заметное понижение процентного содержания P_2O_5 в соломе ячменя.

Таблица 3

Влияние различных доз K_2O и P_2O_5 при аммиачном источнике азота на урожай ячменя в песчаных культурах и содержание в нем P_2O_5 *

Дозы, г/сосуд		Урожай ячменя, г/сосуд		% P_2O_5 (в соломе ячменя)
P_2O_5	K_2O	солома	зерно	
0,2	0,6	11,2	5	0,571
0,2	1,5	12,7	5,5	0,250
0,6	0,6	10,6	2,3	2,930
0,6	1,5	12,2	3,9	2,10

* Доза N 0,6 г на сосуд в форме $(NH_4)_2SO_4$ в смеси с экв. количеством $CaCO_3$.

В общем же из этого опыта следует, что высокие дозы калия в условиях аммиачного питания понижают поступление P_2O_5 в растение, в результате чего отрицательное влияние избытка фосфатов сказывается слабее.

На основании наших прежних исследований [1 и 5] можно предполагать, что резкое пресыщение растительной ткани фосфатами вызывает нарушение нормального хода окислительно-восстановительных процессов, в результате чего способность растений перерабатывать аммиачный азот в органические соединения, как уже отмечалось, заметно понижается. Если калий способствует переработке аммиачного азота в органические соединения, то резкий избыток фосфатов, вызывая торможение этого процесса, как бы понижает физиологическую активность калия.

Отмеченные здесь закономерности выведены из опытов с питанием растений в условиях песчаных культур. Возникает вопрос, в какой мере эти закономерности являются общими и для обычных почвенных условий роста растений, где наличие биологической деятельности — адсорбции и фиксации питательных веществ в почве оказывает существенное влияние на условия питания растений.

Так, если в условиях песчаных культур для использования аммиачного азота растения могут обходиться меньшим количеством фосфора, чем при нитратном питании, то в почвенных условиях относительная потребность растений в фосфатах при различных источниках азота в значительной мере будет определяться особенностями химического состава почвы. При этом особенно большое влияние на условия фосфатного питания при различных источниках азота оказывает наличие в почве подвижных соединений полуторных окислов. На почвах, не содержащих заметных количеств подвижных соединений железа и

алюминия (например, на черноземах, карбонатных почвах и т. п.), так же как и в условиях песчаных культур при внесении нитратных удобрений, потребность растений в фосфатах будет больше, чем при внесении азота в аммиачной форме.

Правда, вследствие деятельности нитрифицирующих организмов различие в этом отношении между растениями, удобренными аммиачным или нитратным азотом в почвенных условиях, может не быть столь резким, как в песчаных культурах, но все же оно достаточно заметно. Так, например, в вегетационном опыте на мощном черноземе Граковского опытного поля НИУИФ изучалось влияние различных доз P_2O_5 при внесении различных форм азотных удобрений. Результаты этого опыта приведены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние доз P_2O_5 на урожай ячменя при различных источниках азота (почва — мощный чернозем) *

Дозы P_2O_5 (в мг на сосуд)	Урожай (г/сосуд) на фоне KCl (0,5 г K_2O) + 0,5 г N в форме					
	$Ca(NO_3)_2$		$(NH_4)_2SO_4$		NH_4NO_3	
	общий	зерно	общий	зерно	общий	зерно
0	19,6	10,1	24,8	11,8	21,0	10,4
200	21,8	11,6	27,9	14,9	24,3	11,6
500	28,9	14,7	29,0	13,4	27,6	14,0

* Урожай по РК (500 мг P_2O_5) — 10,6, в том числе зерна 4,3 г, по К соответственно 8,9 и 3,2 г.

На фоне NK (без P_2O_5) наименьший урожай был получен по кальциевой селитре, наиболее же сильно действовал сульфат аммония: нитрат аммония, содержащий одновременно азот в нитратной и аммиачной форме, занял промежуточное положение. Доза P_2O_5 200 мг на сосуд, по-видимому, вполне удовлетворяла потребность растений в фосфоре при внесении азота в $(NH_4)_2SO_4$, повышение дозы P_2O_5 до 500 мг на фоне сульфата аммония не сказалось положительно на урожае.

При внесении азота в форме NH_4NO_3 и особенно в $Ca(NO_3)_2$ доза P_2O_5 200 мг была недостаточной, и только при дозе P_2O_5 в 500 мг на сосуд урожаи по $Ca(NO_3)_2$ и NH_4NO_3 выровнялись с урожаем, полученным в тех же условиях по $(NH_4)_2SO_4$.

Таким образом, в условиях мощного чернозема потребность растений в фосфоре была большей при внесении нитратных форм азота и меньшей при внесении аммиачного азота.

На кислых подзолистых почвах, содержащих значительное количество химически активных полуторных окислов, внесение физиологически кислых аммиачных удобрений вызывает дальнейшее повышение подвижности полуторных окислов. Последние,

реагируя с фосфатами, переводят их в малодоступные для растений соединения. Поэтому при внесении физиологически кислых аммиачных удобрений в условиях кислых подзолистых почв доступность растениям P_2O_5 в какой-то мере может понизиться, а следовательно, в этом случае может возникнуть необходимость внесения повышенных доз P_2O_5. Однако этот отрицательный момент в действии физиологически кислых аммиачных удобрений на подвижность P_2O_5 в условиях подзолистых почв можно полностью устранить, внося их (аммиачные удобрения) в смеси с $CaCO_3$; при этом $CaCO_3$ берется в таком количестве, чтобы его было достаточно для нейтрализации потенциальной кислотности аммиачного удобрения. Как показали опыты автора [6], проведенные совместно с Ю. Ф. Чириковым, нейтрализация потенциальной кислотности физиологически кислых форм азота путем смешения их с эквивалентным количеством $CaCO_3$ позволяет более экономно и рационально использовать P_2O_5 сопутствующих фосфорных удобрений в условиях кислых подзолистых почв.

Влияние доз и времени внесения калия в условиях аммиачного и нитратного питания растений на их урожай и качество продукции. Недостаток калия вызывает нарушение азотного обмена растений. В условиях аммиачного питания, как уже отмечалось в первой части настоящего сообщения, недостаток калия вызывает аммиачное отравление растений, вследствие чего рост растений сильно задерживается, а при очень низкой степени обеспеченности калием растения погибают. Симптомы калийного голодания при аммиачном питании резко проявляются уже в первые дни после появления всходов растений. На листьях растений в этом случае начинают появляться желтые полоски, ведущие свое начало с верхушки листа, впоследствии эти желтые полоски обесцвечиваются, растение приобретает пестролистность, в дальнейшем же листья скручиваются и постепенно отмирают. Во всех случаях при недостатке калия в условиях аммиачного питания в растениях накапливается в значительном количестве аммиак.

При нитратном питании симптомы калийного голодания появляются позже и не в столь резкой форме. В этих условиях аммиак в растениях не накапливается даже при наиболее крайних проявлениях калийного голодания. Возникает вопрос, можно ли путем последующего достаточного калийного питания вернуть нормальную жизнедеятельность растениям, первоначально подвергнутым калийному голоданию? Для выяснения этого вопроса были проведены вегетационные опыты, в которых изучалось влияние времени внесения калия при различных источниках азота. Опыты были проведены в условиях песчаных культур по схеме, приведенной в таблице 5, в качестве опытного растения был взят картофель, сорт ранний Эпикур.

В первые дни после появления всходов внешний вид растений в сосудах по различным комбинациям удобрений был почти

одинаков. Это объясняется тем, что ростки питались в основном за счет запасных веществ клубня. Через некоторое время растения, росшие по аммиачному азоту при низкой дозе K_2O (0,2 г), стали резко выделяться сильным пожелтением листьев. Кроме того, края листьев этих растений скручивались и впоследствии чернели и отмирали.

Растения, росшие по нитратному азоту при низкой дозе K_2O, имели внешне нормальный вид, хотя развитие их было менее мощным, по сравнению с растениями, получавшими повышенную дозу калия.

Через месяц после появления всходов в 3-м и 4-м вариантах опыта было внесено по 1,0 г K_2O. Через несколько дней после внесения калия уже было заметно его благоприятное действие на развитие растений: ботва картофеля приобрела более интенсивную зеленую окраску и вновь появляющиеся листья были совершенно нормальны. Через 5 дней после внесения калия в 3-й и 4-й варианты было произведено определение аммиака в ботве растений.

В растениях, росших по аммиачному азоту при дозе K_2O 0,2 г (вариант 2), было найдено на 100 г сырого вещества ботвы 72 мг азота NH_3, или в пересчете на 100 г сухого вещества 712 мг азота NH_3.

В растениях, росших по аммиачному азоту, первоначально при дозе K_2O 0,2 г и получивших 2/VI дополнительную дозу K_2O в 1,0 г на сосуд, были обнаружены лишь следы аммиака. Таким образом, за сравнительно короткий срок (5 дней), прошедший со времени внесения добавочной дозы калия, в растениях восстанавливался нормальный азотный обмен.

В растениях всех остальных вариантов опыта не было обнаружено аммиака.

3/VIII была произведена уборка урожая картофеля. Данные приведены в таблице 5.

По аммиачному источнику азота при дозе K_2O в 0,2 г на сосуд урожай ботвы немногим отличался от урожая боты из сосудов, получивших аммиачный азот на фоне высокой дозы K_2O (1, 2 г). Но урожай клубней в первом случае был ничтожно мал. По-видимому, в отсутствие достаточного количества калия в условиях аммиачного питания обмен веществ в растениях нарушался в столь сильной степени, что отток ассимилятов из листьев в запасные органы происходил чрезвычайно медленно. При той же дозе K_2O (0,2 г), но в условиях нитратного питания урожай клубней был во много раз больше, чем при аммиачном питании. Увеличение дозы K_2O до 1,2 г на сосуд вызывало сильное повышение урожаев клубней как по аммиачному, так и по нитратному азоту. При внесении основной дозы K_2O во время роста растений (варианты 3-й и 4-й) урожай клубней по нитратному азоту был все же заметно ниже, чем при внесении 1,2 г K_2O до посадки. В условиях аммиачного питания внесение

1,2 г калия до посадки и внесение его во время роста растений в конечном счете оказало одинаковое влияние на урожай клубней картофеля. Но вообще даже при высокой дозе калия (1,2 г K_2O) урожай клубней картофеля по аммиачному азоту было заметно ниже урожая, полученного в тех же условиях по нитратному азоту. По-видимому, принятая в данном опыте доза P_2O_5 в 0,6 г на сосуд была слишком высокая при аммиачном источнике азота, и, возможно, здесь имело место угнетающее действие избытка P_2O_5 на «аммиачные растения».

В пользу этого предположения говорят и результаты анализа растения (табл. 5).

Во всех случаях при аммиачном питании процент P_2O_5 в растении в несколько раз превышал процент P_2O_5 в растениях, выросших на нитратном источнике азота. Валовое содержание P_2O_5 в урожае «аммиачных растений», несмотря на более низкий их урожай, было все же значительно больше валового содержания P_2O_5 в «нитратных растениях».

В ботве картофеля из этих опытов определялось так же содержание общего азота, а в урожае клубней, помимо азота,— содержание аминокислот и крахмала.

Результаты анализа приведены в таблице 5.

Процентное содержание сухого вещества в клубнях картофеля во всех вариантах опыта по аммиачному азоту было меньше, чем по нитратному. Особенно низкий процент сухого вещества в клубнях был найден при внесении низкой дозы калия (0,2 г K_2O) на фоне аммиачного азота. На фоне нитратного азота наибольший процент сухого вещества в клубнях был обнаружен при внесении дозы K_2O 0,2 г на сосуд. Увеличение дозы K_2O до 1,2 г при нитратном питании вызывало понижение процента сухого вещества в клубнях.

Процент крахмала * в клубнях картофеля, так же как и содержание сухого вещества, было вообще по нитратному источнику азота больше, чем по аммиачному. При этом самый высокий процент крахмала в условиях опыта был найден в клубнях растений, получивших нитратный азот на фоне 0,2 г K_2O. При недостатке калия в условиях аммиачного питания содержание крахмала в клубнях было крайне низким, увеличение дозы K_2O независимо от времени его внесения резко повышало процент крахмала в клубнях.

Содержание общего азота и азота аминокислот в растениях (ботва и клубни) по аммиачному азоту было более высоким, чем по нитратному, при этом по аммиачному азоту содержание общего азота и азота аминокислот, в условиях недостаточного калийного питания, достигло наибольшей величины.

---

* Крахмал извлекался из клубней растений горячим концентрированным раствором $CaCl_2$; определение крахмала производилось колориметрически (с йодом).

Таблица 5

Влияние времени внесения калия на урожай и химический состав картофеля в условиях песчаных культур

№ варианта	Форма N*	Доза и время внесения K_2O	Клубни, г/сосуд	% сухого вещества в клубнях	Урожай сухого вещества, г/сосуд		% P_2O_5		P_2O_5 в урожае, мг/сосуд	% N на сухое вещество ботвы	Клубни — сырое вещество		
					в клубнях	в ботве	в ботве	в клубнях			% N общего	N аминокислот, %	крахмал, %
1	$Ca(NO_3)_2$	0,2 г до посадки	128	18,9	24,2	15,3	0,41	0,632	215,7	1,93	0,46	0,12	13,2
2	$(NH_4)_2SO_4$ + экв. $CaCO_3$	То же	22,1	12,1	2,68	13,9	1,70	1,110	265,8	3,12	0,60	0,25	6,9
3	$Ca(NO_3)_2$	0,2 г до посадки + 1,0 г через месяц после появления всходов	184,1	15,9	29,3	21,8	0,47	0,473	242,0	1,78	0,41	0,12	10,6
4	$(NH_4)_2SO_4$ + экв. $CaCO_3$	0,2 г до посадки + 1,0 г через месяц после появления всходов	98,1	14,7	14,4	12,1	1,34	0,910	293,0	2,51	0,50	0,17	9,8
5	$Ca(NO_3)_2$	1,2 г до посадки	209,3	16,7	35,0	18,3	0,40	0,472	293,2	1,83	0,44	0,14	11,2
6	$(NH_4)_2SO_4$ + экв. $CaCO_3$	То же	93,9	15,6	14,7	16,8	1,27	0,917	338,0	2,27	0,47	0,18	10,2

* N — 0,6 г на сосуд; фон P_2O_5 — 0,6 г на сосуд.

Избыточное содержание азота в ботве картофеля, равно как и резкое увеличение азота аминокислот и очень низкое содержание крахмала в клубнях растений, не получивших достаточного калийного питания в условиях аммиачного источника азота, указывает на сильные нарушения в азотном и углеводном обмене растений в этих условиях.

Содержание сухого вещества, аминокислот, общего азота и крахмала в клубнях растений, первоначально подвергнутых калийному голоданию, но получивших достаточное калийное питание во время роста, было примерно такое же, как и в клубнях растений, получивших достаточное количество калия непосредственно перед посадкой.

Таким образом, вредные последствия первоначального калийного голодания растений как на высоте урожая, так и на его качестве в значительной мере были устранены при последующем обеспечении растений картофеля калием, хотя наиболее высокие урожаи картофеля в опыте все же были получены при внесении достаточной дозы калия перед посадкой растений (на фоне нитратного азота).

В опытах с сахарной свеклой, проведенных в условиях торфо-песчаных культур, изучалось действие доз фосфора и калия при различных сроках их внесения на урожай свеклы и содержание в ней сахара.

Результаты этих опытов приведены в таблице 6.

При недостаточной дозе фосфора или калия урожаи сахарной свеклы при обоих источниках азота были низкие. Содержание сахара в корнях свеклы при этом сильно падало. Особенно резкое понижение сахаристости свеклы имело место при малой дозе калия.

Растения, первоначально подвергнутые фосфатному голоданию, при дальнейшем их снабжении достаточным количеством фосфора, дали нормальный урожай. Содержание сахара в корнях свеклы в этом случае тоже было нормальным, если принять в качестве стандарта свеклу, получавшую полное калийно-фосфатное питание перед посевом.

Растения, росшие вначале в условиях недостаточного калийного питания, развивались очень плохо. Края листьев у них почернели и скручивались. Через 30 дней после появления всходов под эти растения был внесен калий в достаточном количестве, после чего в течение 5—7 дней характерные симптомы калийного голодания на листьях свеклы (почернение и скручивание листьев) исчезли, и растения в этом варианте вскоре по своим внешним признакам почти не отличались от растений, получивших сразу перед посевом полную дозу калия. Равным образом и конечный урожай свеклы в этом варианте опыта был сравнительно высокий, хотя по абсолютной величине он все же был ниже урожая растений, получавших нормальное калийно-фосфатное питание.

Таблица 6

Сахарная свекла, торфо-песчаные культуры

№ варианта	Форма азота	Доза и сроки внесения		Урожай корней свеклы, г/сосуд	% сахара в корнях
		P_2O_5	K_2O		
1	$Ca(NO_3)_2$	0,1 г до посева	2,5 г до посева	132	14,40
2	$(NH_4)_2SO_4$	0,1 „ „ „	2,5 „ „ „	121	13,25
3	$Ca(NO_3)_2$	0,1 г до посева + + 0,9 г через 30 дней после появления всходов	2,5 „ „ „	379	17,57
4	$(NH_4)_2SO_4$	То же	2,5 „ „ „	231	18,25
5	$Ca(NO_3)_2$	1,0 г до посева	2,5 „ „ „	312	18,73
6	$(NH_4)_2SO_4$	1,0 „ „ „	2,5 „ „ „	379	17,60
7	$Ca(NO_3)_2$	1,0 „ „ „	0,2 „ „ „	87	12,27
8	$(NH_4)_2SO_4$	1,0 „ „ „	0,2 „ „ „	Расходящиеся данные	12,85
9	$Ca(NO_3)_2$	1,0 „ „ „	0,2 г до посева + + 2,3 г через 30 дней после появления всходов	250	13,48
10	$(NH_4)_2SO_4$	1,0 „ „ „	0,2 г до посева + + 2,3 г через 30 дней после появления всходов	261	13,07

Примечания. 1. Доза N в опыте = 1,5 г на сосуд размером 30 × × 22 см. 2. Для придания буферности в песок вносился торф, насыщенный CaO и MgO (10 : 1) до pH 6,9. Торфа вносилось 400 г на сосуд. 3. Сахар определялся по Бертрану.

Однако содержание сахара в корнях свеклы, первоначально подвергнутой калийному голоданию и получившей достаточное калийное питание только через 30 дней после появления всходов, было очень низким.

Как видно из приведенных данных, процент сахара в свекле в этом случае был почти таким же низким, как и в свекле, росшей в течение всего вегетационного периода в условиях недостаточного калийного питания. Таким образом, первоначальное калийное голодание свеклы, если даже она впоследствии достаточно снабжается калием, отрицательно сказывается на накоплении в ней сахара.

Влияние доз и времени внесения калия при различных формах азотного удобрения на урожай и сахаристость свеклы изучалось также в вегетационных опытах, проведенных на мощном черноземе Граковского опытного поля НИУИФ.

В этих опытах сравнивались обычные и повышенные дозы калия на фоне аммиачных и нитратных удобрений. При этом

повышенная доза K_2O вносилась или полностью до посева, или же перед посевом вносилась обычная доза K_2O, а во время роста растений вносилось недостающее до повышенной дозы количество калия.

В последнем случае калий вносился в растворе в два приема.

Схема и результаты опыта приведены в таблице 7.

Таблица 7

Вегетационный опыт с сахарной свеклой на мощном черноземе *

Форма азота	Доза K_2O и время внесения	Урожай сахарной свеклы, г/сосуд		% сахара в корнях сахарной свеклы
		корни	ботва	
$Ca(NO_3)_2$	0	423	193	18,20
$Ca(NO_3)_2$	2 г K_2O до посева	493	204	19,99
$(NH_4)_2SO_4$	То же	502	187	19,50
$NaNO_3$	„ „	602	347	19,01
$Ca(NO_3)_2$	6,8 г K_2O до посева	613	272	20,15
$(NH_4)_2SO_4$	То же	560	257	19,48
$NaNO_3$	„ „	593	198	19,50
$Ca(NO_3)_2$	2 г K_2O до посева и 4,8 г K_2O во время роста растений	572	334	20,15
$(NH_4)_2SO_4$	2 г K_2O до посева и 4,8 г во время роста растений	547	292	19,01

* Размер сосуда 30 × 32 см. Вес почвы в сосуде — 17 кг, N — 2,0 г на сосуд, P_2O_5 — 2,0 г на сосуд — в форме $Ca(H_2PO_4)_2$, K_2O — в форме KCl.

Первая доза калия (2,0 г K_2O), внесенная на фоне $Ca(NO_3)_2$ и P_2O_5, заметно повысила урожай, но все же в условиях данного опыта оказалось недостаточной. Наибольший урожай при этой дозе K_2O (2,0 г) получился на фоне натриевой селитры, наличие натрия в которой оказывало положительное действие на урожай сахарной свеклы.

Увеличение дозы K_2O с 2,0 до 6,8 г на сосуд как при нитратном, так и при аммиачном азоте вызвало дальнейшее повышение урожая сахарной свеклы. Абсолютные урожаи в условиях этого опыта были несколько большими при нитратном источнике азота, чем при аммиачном. Следует отметить, что вообще нитратная форма азота для сахарной свеклы во многих случаях имеет известное преимущество перед аммиачной.

При внесении повышенной дозы калия частично перед посевом, частично во время роста растений, урожай сахарной свеклы

был хотя и выше, чем при внесении меньшей дозы K_2O перед посевом, но ниже, чем при предпосевном внесении повышенной дозы калия.

Таким образом, перенесение калия на более поздние стадии развития сахарной свеклы вызвало понижение его эффективности.

В корнях сахарной свеклы было произведено определение процента сахара (по Бертрану); результаты его, приведенные в той же таблице 7, показывают, что внесение калия во всех случаях заметно повысило урожай сахара в свекле.

Выводы

1. В вегетационных и полевых опытах, проведенных на Долгопрудном опытном поле, потребность растений в калии при аммиачной форме азота оказывалась сильнее, чем при внесении нитратного азота.

2. В опытах, проведенных в условиях песчаных культур с картофелем, было обнаружено, что отсутствие достаточного количества калия в условиях аммиачного питания наиболее резко сказывается на образовании клубней картофеля; при недостаточном калийном питании урожай клубней был ничтожно мал, хотя урожай ботвы достигал сравнительно значительной величины.

3. Недостаточное калийное питание растений картофеля в условиях аммиачного питания (песчаные культуры) вызвало накопление NH_3 в надземной массе растений, повысило содержание общего азота в растениях (ботва и клубни), повысило содержание аминокислот в клубнях и резко понизило содержание крахмала в клубнях.

4. В условиях нитратного питания недостаточное снабжение растений калием вызывало общее понижение урожая картофеля. Однако содержание сухого вещества и крахмала в клубнях в этом случае было даже несколько выше, чем при нормальном калийном питании.

5. Нарушение азотного и углеводного обмена в растениях картофеля, подвергнутых калийному голоданию, может быть устранено при последующем внесении калия: при нормальных условиях питания растений внесение калия непосредственно перед посевом является более эффективным, чем внесение его в более поздние стадии развития растения.

6. Первоначальное калийное голодание сахарной свеклы, если даже она впоследствии достаточно снабжается калием, отрицательно сказывается на накоплении в ней сахара.

7. Потребность растений в фосфоре в условиях песчаных культур (при отсутствии свойственной всякой почве поглотительной способности), при нитратном питании проявляется значительно сильнее, чем при аммиачном источнике азота.

8. Избыточное содержание P_2O_5 в питательной среде, в условиях песчаных культур, при аммиачном источнике азота в большинстве случаев вызывает ухудшение роста растений.

Избыточное содержание растворимых фосфатов в субстрате, особенно при относительном недостатке калия, в условиях аммиачного питания резко повышает поступление фосфорной кислоты в растение. Чрезмерное накопление P_2O_5 в растении вызывает «фосфорное пересыщение» растительной ткани, задерживает процесс переработки аммиака в растениях и, следовательно, оказывает на развитие последних отрицательное влияние.

Наоборот, при малом количестве фосфатов в питательной среде аммиачный азот улучшает фосфатное питание растений.

9. Явление адсорбции и фиксации фосфатов в почве оказывает существенное влияние на условия фосфатного питания растений в почвенных условиях.

На почвах, не содержащих заметных количеств подвижных полуторных окислов, например на почвах черноземного типа, потребность растений в фосфатах при внесении нитратных удобрений проявляется сильнее, чем при внесении аммиачных удобрений.

На подзолистых почвах, содержащих значительные количества реакционно способных полуторных окислов, внесение физиологически кислых аммиачных форм азота может вызвать дальнейшее повышение подвижности полуторных окислов и уменьшить тем самым доступность растениям фосфатов; в этих условиях потребность в фосфорных удобрениях при внесении аммиачных форм азота может повыситься.

Отрицательный момент в действии кислых аммиачных форм азота на подвижность фосфатов в условиях подзолистых почв может быть полностью устранен при внесении аммиачных удобрений в смеси с эквивалентным количеством $CaCO_3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчин Ф. В. Почвоведение и агрохимия, 1936 г. (Доклады майской сессии Академии наук СССР, 1935).
2. Arenz B. Bodenkunde und Pflanzenernährung. A. 8 H. 3/4. 1938.
3. Pirschle K. Ztschr. f. Pflanz. Dung. Bod. A. 22, 1921.
4. Дикусар И. Г. Ассимиляция неорганических азотистых соединений высшими растениями и зависимость их от состава питательной среды. Сборник «Современное достижение и задачи физиологии растений». Издание Московск. дома ученых, 1937.
5. Турчин Ф. В. Значение формы азотного удобрения для зольного питания растений. «Новое в удобрении». II, 1937.
6. Турчин Ф. В. и Чириков Ю. Ф. Журнал «Химизация социалистического земледелия» № 8, 1939.

РОЛЬ КАЛИЯ В УСВОЕНИИ АММИАКА И В ОБРАЗОВАНИИ АКТИВНЫХ ФОРМ УГЛЕВОДОВ В РАСТЕНИИ*

В классических исследованиях Д. Н. Прянишникова было установлено, что нормальное усвоение аммиачного азота в растении происходит только при достаточной обеспеченности углеводами, которые являются исходным пластическим материалом для построения углеродного скелета амидов и аминокислот.

В темноте в неассимилирующих ростках новый синтез амидов и аминокислот за счет поступающего извне аммиака происходит только до тех пор, пока не израсходованы наличные запасы углеводов в растении; когда же эти запасы истощаются, синтез амидов прекращается и в растениях накапливается непереработанный аммиак. Дальнейший синтез становится возможным при прорастании на свету, когда в растении в результате ассимиляции углекислоты накопляются углеводы. Равным образом, способность этиолированных, истощенных в отношении углеводов, ростков к переработке аммиака в азотистые органические соединения восстанавливается при искусственном питании ростков сахаром. Основные итоги своих исследований в этом направлении Д. Н. Прянишников сводит к следующей простой схеме:

Условия опыта		Результаты	
Углеводы	Свет	Синтез аспарагина	Накопление аммиака
+	—	+	—
—	—	—	+
+	+	+	—
—	+	—	+

Автор этой статьи, изучая влияние калия на использование молодыми ассимилирующими злаковыми растениями различных форм азота, нашел, что для нормального усвоения аммиачного азота в этих растениях чрезвычайно большое значение имеет калий. Потребность в калии злаковых растений (ячмень, овес, пшеница, рожь) при питании аммиачным азотом проявляется несравненно резче, чем при питании нитратным. Недостаток калия в условиях аммиачного питания вызывает обильное накопление аммиака в растениях, вследствие чего наступает аммиачное отравление, приводящее в крайних случаях к полной гибели растений. Одновременно содержание редуцирующих сахаров в растении в этих условиях не только не понижается, но, наоборот, значительно возрастает.

В таблице 1 приведены данные опытов.

---

* Статья опубликована в книге «Памяти Д. Н. Прянишникова». Изд-во АН СССР, М.—Л., 1950.

Таблица 1

Влияние калия на ячмень и озимую рожь при нитратном и аммиачном питании

Песчаные культуры; pH 7,0; доза N 0,5 г на сосуд с 6 кг песка *

Форма азота	Доза K_2O, г/сосуд	Сухой вес растений, г/сосуд		Содержание в молодых 15-дневных растениях, % на сухое вещество			
				аммиака		глюкозы	
		ячмень	рожь	ячмень	рожь	ячмень	рожь
$Ca(NO_3)_2$	0,05	7,3	9,7	0	0	3,90	7,5
$(NH_4)_2SO_4$	0,05	0,6	2,2	1,04	0,52	12,03	15,0
$Ca(NO_3)_2$	0,80	13,5	12,4	0	0	2,45	5,3
$(NH_4)_2SO_4$	0,80	16,6	16,9	следы		4,92	9,0

* Для придания буферности среде в песок вносился торф, насыщенный CaO и MgO в соотношении 10 : 1. Доза P_2O_5 равнялась 0,3 г на сосуд в форме $Ca(H_2PO_4)_2$. Прочие компоненты питательной смеси вносились в обычно принятых дозах.

Подобные же данные были получены и для многих других растений, изучавшихся в опытах автора и его сотрудников, а именно: для всех представителей семейства злаковых (овес, пшеница, рожь, ячмень, кукуруза), для картофеля, томата, мохорки, горчицы, гороха, фасоли, клевера, люцерны. Недостаток калия при нитратном питании все эти растения переносили неизмеримо легче, чем при аммиачном питании. Основываясь на полученных в этих опытах данных можно было бы утверждать, что калий играет какую-то особую роль в усвоении аммиака, в переработке его в азотистые органические соединения в растении.

Это положение, однако, нуждается в уточнении. То обстоятельство, что недостаток калия во всех перечисленных выше растениях сопровождается повышенным накоплением сахаров, в частности глюкозы, заставило нас подойти к этому вопросу с несколько другой стороны. Если, несмотря на повышенное содержание глюкозы, переработка аммиака в азотистые органические соединения в растении при недостатке калия все же задерживается, то наиболее естественным было допустить, что при недостатке калия содержащаяся в растении глюкоза не обладает достаточной лабильностью; превращение ее в другие соединения, которые могут непосредственно взаимодействовать с аммиаком, например в кетонокислоты, сильно задерживается. Этим и объясняется накопление аммиака и одновременно накопление химически пассивных, устойчивых форм сахаров.

Таким образом, калий не влияет непосредственно на связывание аммиака в азотистые органические соединения в расте-

нии, а его специфическое действие на использование в растении аммиачного азота обусловлено влиянием этого элемента на химическую активность углеводов. Снабжение растений достаточным количеством калия сообщает необходимый импульс для ускорения превращения углеводов в те вещества, которые могут непосредственно связывать аммиак с образованием соответствующих азотистых органических соединений. При такой интерпретации полученных в опытах данных мы должны также допустить, что существует в известных границах пропорциональность между содержанием калия в растении и скоростью превращения пассивных, устойчивых форм углеводов в формы активные, реакционно способные. Это следует из того факта, что потребность растений в калии возрастает с увеличением дозы азота. В этом отношении весьма наглядными являются данные, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Влияние соотношения NH_4 и K в питательной смеси на урожай ячменя

Торфо-песчаные культуры

Доза K_2O, г	Урожай (в г) по различным дозам аммиачного азота					
	0,6 г N		1,2 г N		2,4 г N	
	общий	зерно	общий	зерно	общий	зерно
0,3	27,2	12,7	4,8	0	0	0
0,6	29,8	16,5	14,6	2,2	0	0
1,2	34,7	18,5	25,8	10,7	6,2	0,5
2,4	35,3	19,1	27,3	13,3	7,6	1,4

При умеренной дозе аммиачного азота (0,6 г N) растения дали почти нормальный урожай при первой из изучавшихся в этом опыте доз калия, так что дальнейшее повышение дозы калия сравнительно слабо сказалось на урожае. Но при удвоенной дозе аммиачного азота более или менее нормальный рост растений стал возможным только начиная с третьей дозы калия. Наконец, при внесении чрезмерно высокой дозы аммиачного азота (2,4 г N) не удалось добиться нормального роста растений при любых условиях калийного питания. Внесением наиболее высокой дозы калия в этом случае удалось предотвратить только полную гибель растений. Можно себе представить, что чем больше поступает в растение за определенный период времени аммиака, тем с большей интенсивностью должна происходить метаморфоза углеводов, чтобы обеспечить нужное количество реакционноспособного углеродистого компонента для связывания аммиака. Поскольку же при увеличении дозы калия допускается возможность использования и более высоких доз

аммиачного азота, то отсюда следует, что интенсивность превращения углеводов в растении также определяется степенью насыщенности их тканей калием.

Меньшая потребность растений в калии при нитратном источнике азота является следствием сравнительно медленного процесса редукции нитратов в растительных тканях. Сами же нитраты, как бы сильно они ни накапливались в растении, не производят токсического эффекта. Так как нитратный азот может быть использован для органического синтеза в растении только после предварительной его редукции, то при умеренном снабжении растений нитратным азотом в них будет достаточно реакционноспособного углеродистого компонента для связывания азота даже при слабой насыщенности их калием. Но при сильной перекормке растений нитратами, когда образование продуктов редукции нитратов в единицу времени резко возрастет, потребуется соответственное усиление темпов превращения устойчивых форм углеводов в более активные их формы. Это и может быть достигнуто путем повышения уровня калийного питания растений. В таблице 3 приведены результаты опыта, в котором изучалось влияние на ячмень различных доз калия на фоне возрастающих доз нитратного азота.

Таблица 3

Влияние соотношения NO_3 и K в питательной смеси на урожай ячменя

Торфо-песчаные культуры

Дозы K_2O, г	Урожай (в г) по различным дозам нитратного азота					
	0,6 г N		1,2 г N		2,4 г N	
	общий	зерно	общий	зерно	общий	зерно
0,3	30,4	13,0	28,8	11,3	18,2	5,9
0,6	34,0	12,1	36,8	15,8	26,5	10,9
1,2	37,3	14,3	42,6	16,0	39,9	12,5

Повышение дозы нитратного азота до 1,2 г при наименьшей в этом опыте дозе калия 0,3 г K_2O еще не вызывало заметной депрессии в урожае ячменя, но еще более высокая доза азота (2,4 г N) уже сильно угнетала растение. Угнетение от чрезмерно высокой дозы нитратного азота почти полностью устранялось внесением повышенной дозы калия. При внесении даже такой высокой дозы нитратного азота, как 2,4 г N на сосуд, мы не могли обнаружить аммиака в растениях в аналитически определяемых количествах. По-видимому, отрицательное влияние высоких доз нитратного азота при несбалансированном отношении азота к калию обусловлено только тем, что вследствие усиленного расходования активных, реакционноспособных форм угле-

водов на синтез азотистых органических соединений для других синтетических процессов в растении не хватает необходимого пластического материала. Таким образом, нормальный рост растений возможен лишь при условии, что приток азота в растение находится в соответствии с интенсивностью образования в нем активного реакционноспособного углеродистого материала, что, как мы видим, в свою очередь, определяется степенью насыщенности растений калием.

В этом отношении нитратное питание имеет общие черты с аммиачным питанием, с тем, однако, существенным различием, что активный углеродистый материал в растении при аммиачном питании расходуется значительно быстрее, чем при нитратном питании. Отсюда вытекает и более высокая потребность растений в калии при аммиачном питании и отравление растений аммиаком при недостатке калия вследствие несоответствия между скоростью поступления аммиака и скоростью образования в растении реакционноспособного углеродистого материала, необходимого для связывания аммиака.

С точки зрения развитых здесь положений становится очевидным, что факторы, тормозящие поступление аммиачного азота в растения, одновременно могут понижать потребность их в калии. С наибольшей скоростью аммиачный азот поступает в безбуферных средах — в песчаных или водных культурах, и именно в этих условиях наиболее резко проявляется повышенная потребность растений в калии при использовании аммиачного азота. Но если добавить к песку какой-либо адсорбент, который понижал бы подвижность аммиачного азота, то потребность растений в калии значительно уменьшится. В качестве примера приводим результаты опыта (с ячменем), в котором испытывалось влияние различных доз калия при аммиачном источнике азота, в чистом песке и в песке с добавкой торфяного буфера.

Азот был дан в форме $(NH_4)_2SO_4$ в смеси с эквивалентным количеством $CaCO_3$ (табл. 4).

Таблица 4

Влияние добавки торфа на потребность растений в калии

Песчаные культуры. Доза N — 0,6 г на сосуд

Доза K_2O, г	Сухой вес ячменя, г	
	на песке без торфа	на песке + 3% торфа
Без калия	Растения погибли	
0,05	То же	
0,1	Растения погибли	14,5
0,3	7,2	25,2
0,6	19,2	26,9

Оптимальной средой для роста растений при аммиачном питании будет, очевидно, такая среда, из которой растения могли бы брать аммиак не сразу большими порциями, как это происходит в песке, а постепенно, небольшими порциями, обеспечивающими действительную потребность растений в азоте в каждый данный момент, с тем чтобы в растениях всегда был необходимый запас активных углеводов.

Таким образом, в предшествующем изложении мы должны были исходить из признания существования в растении двух, различающихся по своей реакционной способности модификаций углеводов: 1) активных форм, которые вследствие высокой их лабильности и способности к быстрым превращениям используются при связывании аммиака в растении в качестве, если можно так сказать, резерва первой очереди, и 2) пассивных форм, обладающих большой устойчивостью и низкой реакционной способностью. Поскольку при недостатке калия указанные выше растения обогащаются растворимыми углеводами, а при аммиачном питании в них накапливаются, кроме того, и большие количества аммиака, мы высказали предположение, что содержащийся в растениях в этом случае, т. е. при недостатке калия, избыток углеводов представлен пассивными, устойчивыми их формами, которые не могут с достаточной скоростью подвергнуться превращениям, ведущим к образованию веществ, способных связывать аммиак. Так как при достаточной обеспеченности калием углеводы, по-видимому, значительно быстрее вовлекаются в обмен веществ в растении, то мы пришли к заключению, что калий ускоряет превращение устойчивых, пассивных форм углеводов в лабильные, активные, формы. Если теперь допустить, что могут существовать такие растения, в которых по самой их природе образуется достаточно много активных углеводов, то тогда, в соответствии с развитыми выше положениями, калий не должен оказывать специфического влияния на использование аммиака в таких растениях.

Изучая отношение ячменя к аммиаку и калию в различных стадиях развития этого растения, мы обнаружили, что в стадии, предшествующей колошению, аммиак не накапливался в растении даже в тех вариантах опыта, в которых калий был в резком минимуме и где прежде в более молодых растениях мы неизменно находили значительные количества непереработанного аммиака. В то же время оказалось, что обычного избытка редуцирующих углеводов в растениях при недостатке калия в этом случае также не было. При изучении качественного состава редуцирующих углеводов было найдено, что значительная часть их представлена фруктозой, содержание которой в растениях с недостаточным и нормальным калийным питанием составляло соответственно 1,07 и 1,82% на сырой вес растений. В молодых ростках всех тех растений, которые не могли усваивать аммиачный азот при недостатке калия, редуцирующие угле-

воды представлены в сновном альдозами, и в частности глюкозой.

Наличие значительных количеств фруктозы в более взрослых растениях ячменя, является, следовательно, новым фактором. Возникло предположение, не является ли фруктоза более активным и реакционноспособным углеводом, обеспечивающим быстрое связывание аммиака в растении, даже в условиях недостаточного калийного питания?

Как известно, моносахариды могут существовать в нормальной устойчивости (α и β-формы) и неустойчивой (γ-форма) модификациях. По химическим свойствам неустойчивые γ-формы отличаются значительно большей способностью к реакциям. Вследствие резко выраженной неустойчивости и высокой реакционной способности γ-формы моносахаридов все больше привлекают внимание химиков и биологов, так как этим неустойчивым формам углеводов приписывается важная роль в синтетических процессах в растении. Природные альдозы обычно представлены нормальными устойчивыми формами. В отличие от альдоз фруктоза, содержащаяся в таких природных ди- и полисахаридах, как сахароза, раффиноза, инулин, находится в лабильной γ-форме. Можно предполагать, что и свободная фруктоза в растении, хотя бы частично, может быть представлена лабильной ее формой. Но даже устойчивая форма фруктозы, согласно имеющимся в литературе данным, из всех обычных устойчивых форм моносахаридов обладает наиболее высокой реакционной способностью. Представлялось поэтому весьма важным выяснить, будет ли калий оказывать специфическое влияние на использование аммиачного азота в тех растениях, в углеводном составе которых преобладает фруктоза с самого начала их развития.

Такие опыты были проведены в 1946 г. с садовой земляникой, цикорием и подсолнечником. В листьях этих растений, по данным наших анализов, всегда удается обнаружить фруктозу в количестве от 3 до 6% и больше на сухой вес растений.

В опытах 1947 г. в качестве растений с большим содержанием фруктозы изучались: кок-сагыз, топинамбур, георгин, хлопчатник. Из растений «глюкозного» типа для этих опытов был использован ячмень, который можно рассматривать как своего рода контроль к растениям «фруктозного» типа. Результаты опытов со всеми растениями, в углеводном составе которых представлена в больших количествах фруктоза, совершенно однозначны. Во всех случаях потребность этих видов растений в калии при аммиачном питании была выражена не сильнее, а, наоборот, даже слабее, чем при нитратном питании. Это следует из таблицы 5.

Те же результаты были получены и в опытах с другими растениями «фруктозного» типа, приводить здесь эти данные нет надобности. Опыты, проведенные одновременно по той же схеме

Таблица 5

Влияние различных доз калия на урожай растений «фруктозного» типа при нитратном и аммиачном питании

Песчаные культуры. Доза N — 0,6 г на сосуд

Форма азота	Доза K_2O, г	Сухой вес растений, г				
		кок-сагыз		топинамбур		хлопчатник
		надземная масса	корни	надземная масса	клубни	надземная масса
$Ca(NO_3)_2$	0,05	3,8	2,2	24,2	8,6	8,3
$(NH_4)_2SO_4$		6,1	5,4	37,3	13,6	11,2
$Ca(NO_3)_2$	0,15	4,3	3,5	28,4	16,0	15,5
$(NH_4)_2SO_4$		7,4	5,6	43,3	18,2	20,0
$Ca(NO_3)_2$	0,60	7,7	7,7	44,7	21,9	27,7
$(NH_4)_2SO_4$		9,5	8,4	48,1	22,9	24,4

с ячменем, — растением «глюкозного» типа, дали совсем другие результаты (табл. 6).

Таблица 6

Влияние различных доз калия на урожай ячменя — растения «глюкозного» типа — при нитратном и аммиачном питании

Песчаные культуры

Доза K_2O, г	Сухой вес, г			
	в форме $Ca(NO_3)_2$		в форме $(NH_4)_2SO_4$	
	общий	зерно	общий	зерно
0,05	15,7	7,0	2,0	0
0,15	22,4	11,2	12,1	3,9
0,60	27,8	9,3	27,7	9,9

Приведенные в таблице 6 данные опыта с ячменем полностью совпадают с результатами других аналогичных опытов, проведенных в предыдущие годы с растениями «глюкозного» типа. Следовательно, во внешних условиях проведения опытов с растениями «фруктозного» типа не было каких-либо дополнительных факторов, которые могли бы оказать влияние на отношение этих растений к калию при том или ином источнике азота.

Если в растениях «глюкозного» типа при аммиачном источнике азота в условиях недостаточного калийного питания накапливаются непереработанный аммиак и не используемая в процессе обмена веществ глюкоза, то растения «фруктозного» типа в этом отношении ведут себя совершенно иначе: даже при крайне низком содержании калия в питательной среде в

этих растениях не происходит накопления непереработанного аммиака. В отличие от растений «глюкозного» типа в растениях, богатых фруктозой, недостаток калия не вызывает повышенного накопления редуцирующих углеводов, а, наоборот, резко понижает их содержание (табл. 7).

Таблица 7

Влияние различных доз калия на содержание сахаров в подсолнечнике — растении «фруктозного» типа — при нитратном и аммиачном питании

Песчаные культуры

Форма азота	Доза K_2O	Сухой вес растений	NH_3 в растениях	Содержание сахара, % на сухое вещество			
				сумма редуцирующих сахаров		фруктоза	
	г			в стеблях	в листьях	в стеблях	в листьях
$Ca(NO_3)_2$	0	5,6	0	7,2	6,0	3,5	1,5
$(NH_4)_2SO_4$	0	8,0	0	5,5	7,6	2,1	2,4
$Ca(NO_3)_2$	0,1	14,0	0	15,0	10,1	7,1	6,6
$(NH_4)_2SO_4$	0,1	17,6	0	17,5	11,1	11,2	4,9
$Ca(NO_3)_2$	0,6	25,1	0	20,6	10,5	12,4	4,4
$(NH_4)_2SO_4$	0,6	22,2	0	18,9	12,6	12,8	6,6

При отсутствии калия в листьях и стеблях подсолнечника сильно падает как общее содержание редуцирующих сахаров, так и в особенности фруктозы. Но разница в содержании сахаров в подсолнечнике при внесении малой (0,1 г) и нормальной (0,6 г) дозы K_2O выражена неясно.

Водные вытяжки из всех растений фруктозного типа на холоду моментально восстанавливают подщелоченный раствор хлорного золота и очень быстро восстанавливают до металлической ртути реактив Несслера. При этом оказалось, что существует определенная зависимость между условиями калийного питания растений и их способностью к восстановлению щелочных растворов золота или ртути. Эта способность сравнительно слабо выражена для растений, росших без калия, сильнее — при малых дозах калия и наиболее резко — при нормальном калийном питании. Если количество хлорного золота, восстанавливаемого в единицу времени вытяжкой из «фруктозных» растений, росших без калия или при крайне низкой дозе калия (0,05 г K_2O на сосуд с 6—7 кг песка), принять за единицу, то соответствующие значения для растений по другим дозам калия в среднем могут быть выражены следующими относительными величинами:

без калия или 0,05 г K_2O 1
0,1—0,15 г K_2O 5
0,6 г K_2O 12

Так как способность к быстрому восстановлению на холоду растворов тяжелых металлов присуща активным формам углеводов и ациклическим формам, то эти данные подтверждают высказанные выше предположения относительно значения калия для образования в растении активных форм углеводов.

В опытах, проведенных Л. И. Оболенской, было обнаружено, что гречиха и при аммиачном, и при нитратном питании совершенно одинаково относится к изменению доз калия. Подобно растениям «фруктозного» типа гречиха не показывала никаких симптомов аммиачного отравления даже при полном отсутствии калия. Соответствующие исследования показали, однако, что в углеводном составе гречихи фруктоза отсутствует. Вместе с тем в гречихе при недостатке калия было обнаружено много аммиачного азота. В условиях нормального калийного питания содержание аммиака в растениях резко падало. В таблице 8 приведены результаты одного из серии этих опытов с гречихой.

Таблица 8

Влияние различных доз калия на урожай гречихи при нитратном и аммиачном питании

Песчаные культуры. Доза N 0,6 г на сосуд

Доза K_2O, г	Сухой вес растений, г		Содержание в растениях, % на сухое вещество
	форма азота		
	$Ca(NO_3)_2$	$(NH_4)_2SO_4$	$(NH_4)_2SO_4$
0	2,6	2,9	0,405
0,1	8,6	10,9	0,216
0,6	12,1	12,2	0,098

То обстоятельство, что гречиха в отсутствие калия или при низкой дозе калия не страдала от аммиачного отравления, несмотря на высокое содержание аммиака в растении, обусловлено, по-видимому, сильной кислотностью клеточного сока гречихи. Активная кислотность отжатого из гречихи сока колебалась в интервалах pH 3,6—4,2. Гречиха, следовательно, относится к «кислотным» растениям, обладающим способностью обезвреживать аммиак путем связывания его в аммонийные соли органических кислот. Тем не менее дальнейшее превращение аммонийного азота и в этом «кислотном» растении достаточно гладко протекает только при достаточном количестве калия. Таким образом, принципиально гречиха является растением «глюкозного» типа. Если это растение все же может переносить аммиачный азот и при низком уровне калийного питания, то это обусловлено лишь «кислотным» механизмом обезвреживания аммиака в растении.

Некоторые из изучавшихся в наших опытах растений в различные стадии их роста вследствие происходящих в их углеводном составе изменений ведут себя то как растения «глюкозного типа, то как растения «фруктозного» типа. Выше уже отмечалось, что ячмень, являющийся в первых стадиях своего развития типичным «глюкозным» растением, отличающимся сильной чувствительностью к аммиачному азоту. В более поздних стадиях, после выхода в трубку, вследствие появления фруктозы в листьях, ячмень становится уже нечувствительным к аммиаку и ведет себя подобно растениям «фруктозного» типа. В молодых ростках сахарной свеклы фруктоза почти отсутствует; поэтому в ранней стадии развития свекла относится к аммиаку как «глюкозное» растение. Несколько позже, когда в листьях свеклы образуется фруктоза, это растение становится мало чувствительным к аммиачному азоту.

В растениях «глюкозного» типа при недостатке калия всегда накапливаются в избытке небелковые органические соединения азота. Накопление небелкового азота достигает громадных размеров при аммиачном источнике азота, когда отношение азот белковый : азот небелковый часто падает ниже единицы. Это показывает, что при недостатке калия синтез белка задерживается. В растениях, содержащих фруктозу, этого не происходит; в них при очень низких дозах калия как при аммиачном, так и при нитратном источнике азота общее содержание небелковых форм азота выражалось весьма скромной величиной — порядка 0,1—0,2% при содержании белкового азота 1,5—2,5%. Результаты опытов приведены в таблице 9. Азот был дан в форме $(NH_4)_2SO_4$.

Таблица 9

Влияние калия на азотный обмен в растениях «глюкозного» и «фруктозного» типа

Песчаные культуры; доза N 0,6 г на сосуд

Растения	Доза K_2O, г	Формы азота в растениях, % на сухое вещество					
		аммиак	аминокислоты и амиды	прочие небелковые формы азота	сумма небелкового азота	белковый азот	отношение белкового азота к небелковому
Ячмень („глюкозный" тип)	0,1	0,75	1,16	1,18	3,09	2,72	0,9
	0,6	Следы	1,19	0,58	1,77	3,18	1,8
Подсолнечник („фруктозный" тип)	0,1	0	0,047	0,113	0,16	1,93	12,0
	0,6	0	0,049	0,121	0,17	1,41	8,3

Растения снимались для анализа в трехнедельном возрасте.

Согласно существующим представлениям, синтез белка в растении происходит только при достаточном количестве сахаров. На основании результатов наших исследований можно

считать, что и для образования белка, так же как и для связывания аммиака, необходимо наличие достаточных количеств активных форм сахаров. Поэтому калий, катализирующий реакции образования активных углеводов, оказывает тем самым положительное влияние на синтез белка в растениях, углеводный состав которых при недостатке калия представлен малоактивными формами (растения «глюкозного» кипа).

Достаточное содержание фруктозы в растениях предопределяет наличие в них необходимых количеств активных форм сахаров, поэтому синтез белка в таких растениях, так же как и связывание аммиака в азотистые органические соединения, легко протекает и при недостатке калия. Таким образом, значение калия в азотном обмене растений определяется ролью этого элемента в образовании активных форм углеводов, наличие которых необходимо для нормального хода превращений азотистых веществ в растении.

Итоги всех изложенных здесь исследований выразим в следующей схеме, которую можно рассматривать как дальнейшее развитие схемы Прянишникова, приведенной в начале настоящей работы. В этой схеме в левой части таблицы знаками + и — соответственно обозначены обеспеченность и необеспеченность растений калием и различными сахарами.

Таблица 10

Факторы, определяющие усвоение аммиака			Состояние азотного обмена в растении	
калий	устойчивые сахара	лабильные активные сахара	накопление аммиака	синтез белка
—	+	—	+	—
+	+	—	—	+
+	—	—	+	—
—	—	+	—	+
+	+	+	—	+

ЛИТЕРАТУРА

1. Прянишников Д. Н. Азот в жизни растений и в земледелии СССР. Изд. АН СССР, 1945.
2. Прянишников Д. Н. Единство строения белковых веществ в их основных превращениях в растительном и животном организме. Журн. Опытной агрономии, т. 13, 5, 1912.
3. Кузин В. О химии и строении сахаров. «Успехи химии», т. VIII, вып. 8, 1939.
4. Турчин Ф. В. Роль калия и фосфора в использовании растениями нитратного и аммиачного азота. Доклады майской сессии АН СССР. В кн.: «Агрохимия и почвоведение», 1936.
5. Турчин Ф. В. Влияние калия на использование аммиачного азота и синтез белка в растениях в связи с особенностями их углеводного состава. ДАН СССР, т. 57, № 1, 1947.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АЗОТА, ФОСФОРА И КАЛИЯ В ПИТАНИИ РАСТЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМИ НИТРАТНЫХ И АММОНИЙНЫХ ФОРМ АЗОТА *

В проведенных ранее исследованиях [1] было установлено, что относительная потребность растений в фосфорных и калийных удобрениях в значительной мере зависит от формы применяемого азотного удобрения. При внесении азота в аммонийной форме потребность растений в калии выше, а потребность в фосфатах ниже, чем тогда, когда азот вносится в нитратной форме. Эта зависимость наиболее резко проявляется в условиях песчаных или водных культур, когда внесенные удобрения не подвергаются в среде сколько-нибудь существенным превращениям, в результате которых могла бы измениться или форма их соединений (например, нитрификация аммиака), или степень их подвижности (ретроградация фосфатов) и т. п. В качестве примера можно привести следующие данные таблицы 1.

Таблица 1

Влияние доз фосфора и калия на урожай овса при различных источниках азота в песчаных культурах (pH 6,7. Доза азота — 0,5 г на сосуд 15 × 20 см)

Доза, г/сосуд		Урожай, г/сосуд					
		$Ca(NO_3)_2$		NH_4NO_3		$(NH_4)_2SO_4$	
P_2O_5	K_2O	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома
0,05	0,50	4,0	10,0	6,7	18,2	8,2	22,9
0,50	0,50	10,9	26,7	9,9	25,1	4,6	16,1
0,50	0,1	4,9	14,7	2,9	11,3	Растения погибли	

Небольшая доза P_2O_5 (0,05 г) в этом опыте оказалась наиболее благоприятной для роста растений при аммонийном источнике азота и дала наихудшие результаты на фоне нитратного азота. Увеличение дозы P_2O_5 до 0,50 г вызывала резкое улучшение роста растений при внесении нитратного азота и отрицательно сказалось при внесении азота в форме сульфата аммония.

При внесении небольшой дозы калия (0,1 г K_2O) растения по фону сульфата аммония заметно страдали и потом погибли. В этом, как и в других подобных опытах, при внесении азота в комбинированной аммонийно-нитратной форме растений по их отношению к дозам фосфора и калия занимали промежуточное положение между растениями в вариантах с чистым нитратным или чистым аммонийным азотом.

* Статья опубликована в журнале «Агрохимия» № 5, 1964.

Изучение влияния формы азотного удобрения на поступление в растение отдельных катионов и анионов показало, что в условиях водных или песчаных культур при нитратном питании происходит более интенсивное поступление катионов, а при аммиачном, наоборот, поступление катионов снижается и резко усиливается поступление анионов. При этом разница в выносе катионов растениями при нитратном и аммиачном питании создается главным образом за счет резкого усиления поступления кальция при нитратном питании. Различия же в поступлении калия и магния при обеих сравниваемых формах азота сравнительно незначительны. При использовании аммиачного азота наиболее усиливается поступление в растение фосфатных ионов (табл. 2).

Таблица 2

Влияние форм источника азота на поступление в растения отдельных зольных элементов в песчаных культурах

Форма источника азота	Вынос ячменем зольных элементов, мг-экв/г усвоенного растениями азота							
	P_2O_5	Cl	SO_4	K_2O	CaO	MgO	сумма анионов	сумма катионов
Нитратная	11,0	3,0	14,3	51,8	19,0	2,6	28,3	73,4
Аммонийная	27,6	4,0	21,2	46,8	8,9	2,3	52,8	58,9

Повышенное требование растений к концентрации калия в питательной среде при аммиачном источнике азота не связано со сколько-нибудь значительным ослаблением поступления этого элемента в растение в результате антагонизма ионов аммония и калия.

Как будет показано ниже, необходимость более усиленного снабжения растений калием при использовании ими аммиачного азота обусловлена специфической ролью калия в метаболизме азота в растении.

Различие же в требовании растений к концентрации фосфора в питательной среде при аммиачном и нитратном питании определяется, по-видимому, неравенством условий для поступления фосфатов в растение в обоих этих случаях, неравенством, вытекающим из особенностей взаимодействия аммонийного, нитратного и фосфатного ионов при их поступлении в растение. Более полное представление о характере этого взаимодействия дают результаты опыта, в котором изучалось влияние изолированного внесения фосфора и совместного его внесения с азотом и калием. В этом опыте в сосуд диаметром 23 см вставлялся сосуд диаметром 15 см. Во внутренний сосуд и в пространство между внутренним и внешним сосудами вносился кварцевый песок, буфер из промытого кислотой и водой торфа, насыщенного кальцием и магнием до pH 6,7, сумма микроэлементов (B, Cu, Mn), а затем вводились основные пита-

тельные вещества соответственно схеме опыта: аммиачный азот вносился в форме $(NH_4)_2SO_4$, нитратный — в $Ca(NO_3)_2$, P_2O_5 — в $Ca(H_2PO_4)_2$ и K_2O — в K_2SO_4. Предварительно выращенные на чистом кварцевом песке проростки кукурузы высаживали на границе между внутренним и внешним сосудом, при этом корни проростков делили на две равные пряди, одну из которых помещали во внутренний, а другую во внешний сосуд (табл. 3).

Таблица 3

Влияние совместного и раздельного внесения N, P_2O_5, K_2O на поступление в растения кукурузы P_2O_5 (метод изолированного питания, песчаные культуры)

Схема опыта		На сухой вес растений, %		Относительные величины	
внутренний сосуд	внешний сосуд	азот внесен в $Ca(NO_3)_2$	азот внесен в $(NH_4)_2SO_4$	$Ca(NO_3)_2$ —	$(NH_4)_2SO_4$
NK	P	0,343	0,340	100	100
N	PK	0,460	0,353	135	103
NP	K	0,164	0,687	48	202
NPK	—	0,215	0,805	62	237

Если за 100 принять процент P_2O_5 в растениях при изолированном внесении фосфора, то при совместном внесении фосфора с азотом процент P_2O_5 в случае нитратного азота падает в 2 раза, а при аммиачной форме азота, наоборот, возрастает в 2 раза и больше. Таким образом, ионы NO_3 подавляют, а ионы NH_4, наоборот, способствуют поступлению фосфатных ионов в растение. Далее было найдено, что при увеличении концентрации P_2O_5 в среде происходит соответствующее возрастание поступления в растения аммиачного азота (табл. 4).

Таблица 4

Влияние концентрации P_2O_5 в питательном растворе на поступление в растения нитратного и аммиачного азота

Концентрация P_2O_5, мг/л	Поступило в растение азота за 7 дней			
	аммиачное питание		нитратное питание	
	мг N	относительные величины	мг N	относительные величины
10	89	100	128	100
30	103	117	119	93
60	129	145	127	100
90	125	163	123	96

При некотором избытке P_2O_5 в питательном растворе поступление аммиачного азота возрастает до такой степени, что

растение не справляется с его переработкой на синтез аминокислот и белка, и непереработанный аммиак накапливается в больших количествах в растениях. Последнее может привести к ухудшению роста растений, а в предельных случаях даже к полной гибели их от аммиачного отравления. Так, в одном из наших опытов в песчаных культурах при дозах азота 0,2 г и P_2O_5 — 0,25 г на 1 кг песка при аммиачном источнике азота содержание аммиака в проростках растений ячменя достигло 1,5% на сухой вес проростков, которые в скором времени погибли. В этих же условиях, но при нитратном источнике азота, растения хорошо развивались до конца вегетации.

Итак, из результатов всех этих опытов следует, что поступление в растения фосфатных и аммонийных ионов происходит в тесной взаимной связи: поступление в растение одного из этих ионов в какой-то мере избирательно увлекает за собой другой ион. Поэтому степень использования P_2O_5 растениями при аммиачном питании всегда будет выше, чем при нитратном питании. Однако необходимо учитывать, что в почвенных условиях аммиачный азот вследствие нитрификационного процесса с большей или меньшей скоростью трансформируется в нитратный азот, поэтому связь между формой азотного удобрения и использованием растениями сопутствующих фосфорных удобрений не столь явная, как в условиях водных или песчаных культур. Но тем не менее есть основания считать, что и в почвенных условиях в первое время после внесения аммонийных удобрений, когда они в основной своей массе еще не подверглись воздействию нитрификаторов, поступление P_2O_5 в растения происходит более интенсивно, чем при внесении нитратных удобрений. Вероятно, по этой причине фосфаты аммония на почвах с нейтральной реакцией и на карбонатных почвах являются более эффективными источниками P_2O_5, чем суперфосфат. Так, в опытах 1963 г. на мощном черноземе Граковского опытного поля Научного института по удобрениям и инсектофунгицидам прибавка урожая от P_2O_5 фосфатов аммония (диаммония фосфата и моноаммония фосфата) в среднем была на 20—25% выше по сравнению с суперфосфатом. Значительное преимущество фосфатов аммония перед суперфосфатом было установлено в опытах с хлопчатником на карбонатных сероземах в районах Средней Азии [2], а также в опытах с локальным внесением небольших доз P_2O_5 под зерновые и другие культуры в различных районах СССР на черноземных почвах и других насыщенных основаниями почвах [3]. Опыты Dion и сотр. [4], проведенные с использованием изотопа P^{32}, показали также, что P_2O_5 из аммофоса поступала в растения пшеницы и ячменя значительно лучше, чем из суперфосфата. Так как фосфаты аммония, помимо высокой их эффективности, обладают весьма хорошими физико-химическими свойствами и являются высококонцентрированными удобрения-

ми, широкое развитие их производства следует признать весьма целесообразным. Другой вывод, который напрашивается из рассмотренных выше особенностей взаимодействия фосфатных и аммонийных ионов, сводится к тому, что на почвах, не имеющих кислой реакции, при применении аммиачных удобрений можно более экономно использовать фосфорные удобрения. В частности, при недостатке фосфатов, при применении их в малых дозах, особенно при локальном внесении, аммиачные удобрения могут дать лучший эффект, чем нитратные удобрения.

На такую возможность указывают данные следующего опыта (табл. 5).

Таблица 5

Влияние формы азотного удобрения на урожай ячменя и использование им P_2O_5 на известкованной подзолистой суглинистой почве (вегетационные опыты)

Удобрения	Урожай сухого вещества, г	P_2O_5 в растениях	Вынос P_2O_5 урожаем, мг
Фон К	11,1	0,422	46,8
Фон + Ca $(NO_3)_2$	13,3	0,379	50,32
Фон + $(NH_4)_2SO_4$	18,7	0,369	69,2
Фон РК	15,7	0,490	77,0
Фон + Ca $(NO_3)_2$	36,6	0,374	132,7
Фон + $(NH_4)_2SO_4$	35,9	0,398	142,9

Доза (г/сосуд): N — 0,5; P_2O_5 — 0,3; K_2O — 0,5.

Без внесения фосфорного удобрения (фон К) растения по аммиачному азоту лучше использовали запасы усвояемых фосфатов почвы, что соответственно сказалось на урожае. При внесении фосфорного удобрения разницы в урожае по обеим формам не было, но вынос P_2O_5 урожаем был несколько выше в случае аммиачного азота.

Для изучения роли калия в использовании растениями аммиачного азота были проведены опыты с использованием меченного изотопом N^{15} сульфата аммония. Растения овса предварительно выращивали в условиях водных культур на растворах с очень низким содержанием калия — 0,05 г K_2O на сосуд емкостью 5 л и на растворах с нормальным содержанием калия — 0,50 г K_2O на сосуд. И в том и в другом случае в качестве источника азота вносили кальциевую селитру из расчета 0,3 г на сосуд, а также все другие необходимые для растений макро- и микроэлементы в оптимальных дозах. Через 3 недели после закладки опыта растения пересаживались на новые питательные растворы, азот в которых был представлен в форме меченого сульфата аммония с содержанием 12,5% избытка атомов N^{15}. Во время опыта реакция раствора поддер-

живалась на уровне pH 6,5—6,7 путем добавления 0,1 н. NaOH. Через определенные промежутки времени (от 48 до 192 часов) подопытные растения снимали с раствора и подвергали анализу. Выделенные из растений отдельные фракции азота после окисления на вакуумной установке до N_2 поступали для изотопного анализа на масс-спектрометре МИ-1301. Урожайные данные, данные химического и изотопного анализов приведены в таблице 6 *.

Таблица 6

Содержание отдельных фракций азота и их обогащение изотопом N^{15} в надземной массе овса, при экспозиции на питательном растворе с меченым аммонийным азотом (атом% избытка N^{15} = 12,5)

Продолжительность экспозиции растений на N^{15}, час.	Доза калия, г/сосуд	Сырой вес растений, г/сосуд	Содержание отдельных фракций азота в растениях, мг/сосуд				Обогащение изотопом, атом% изб N^{15}			
			NH_3	аминокислоты	белок	общий азот	NH_3	аминокислоты	белок	общий азот
48	0,50	153	7,37	164	383	554	2,28	0,81	0,287	0,444
48	0,05	65	7,53	91	223	312	1,84	0,725	0,178	0,403
96	0,50	157	11,3	161	445	619	2,70	1,28	0,572	0,794
96	0,05	70	12,15	117	247	375	2,89	1,22	0,430	0,76
192	0,50	190	23,7	222	560	812	4,57	2,87	1,58	2,017
192	0,05	74	21,7	122	260	404	5,20	2,76	0,99	1,770

Зная содержание изотопа N^{15} в использованном для опыта меченом сульфате аммония и обогащение изотопом N^{15} отдельных, выделенных из растений фракций азота, можно рассчитать, какое количество меченого азота использовалось на образование в растениях отдельных азотистых веществ.

Но так как исходные растения (до экспозиции на N^{15}) в сериях с малой дозой калия имели значительно меньшую массу, чем растения с нормальной дозой калия, то будет правильным, если мы количество усвоенного меченого азота выразим в процентах к азоту белка — главного азотистого компонента клетки. В этом случае можно рассчитывать на получение более точной информации об особенностях азотного обмена исследуемых растений. Эти данные приведены в таблице 7.

Как следует из этой таблицы, степень обеспеченности растений калием не оказывала влияния на поступление в растение аммиачного азота, так как общее количество усвоенного растениями азота как при недостатке, так и при достаточном количестве калия было одинаково. Но дальнейшее использование азота в растении на синтез отдельных азотистых веществ было

* Опыты проведены И. А. Корицкой и Г. Г. Жидких.

Таблица 7

Усвоение растениями меченого азота, % к содержанию белкового азота

Продолжительность экспозиции растений на N^{15}, час.	Доза K_2O, г	Общее количество усвоенного растениями меченого азота	Распределение меченого азота между отдельными азотистыми фракциями растений		
			аммиак	аминокислоты	белок
48	0,50	5,43	0,35	2,78	2,80
48	0,05	4,69	0,54	2,37	1,78
96	0,50	8,77	0,55	3,65	4,57
96	0,05	9,54	1,14	4,63	3,51
192	0,50	23,29	1,54	9,15	12,60
192	0,05	22,0	3,45	10,65	7,90

весьма различным. При недостатке калия синтез белка резко падал, значительное количество аммиачного азота оставалось в растении в непереработанном виде. Хотя количество меченого азота, найденного в составе свободных аминокислот, при недостатке калия было не меньше, а в последней экспозиции на N^{15} даже больше, чем при норме калия, но, учитывая также и аминокислоты, использованные на синтез белка, можно считать, что интенсивность синтеза аминокислот при недостатке калия понижается, хотя и в меньшей степени, чем синтез белка. Состояние азотного обмена характеризуется также интенсивностью обновления белка [5]. В живой клетке происходит непрерывный распад белка и одновременно новый его синтез за счет аминокислот обменного фонда. Если аминокислоты мечены, то по интенсивности их включения в состав белка можно судить о степени его обновления.

В таблице 8 приведены показатели обновления белка в рассматриваемом здесь опыте. Процент обновления белка рассчитывался по формуле $(Z_A : Z_p) \cdot 100$, где Z_A — обогащение изотопом N^{15} азота аминокислот, Z_p — обогащение изотопом N^{15} азота белка.

Таблица 8

Влияние калия на интенсивность обновления белка в зеленой массе молодых растений ячменя

Продолжительность экспозиции растений на N^{15}, час.	Обновление белка, %	
	доза K_2O 0,50 г	доза K_2O 0,05 г
48	35,4	23,6
96	44,7	35,2
192	55,2	36,0

При недостатке калия интенсивность обновления белка падает, что указывает на общее снижение интенсивности обмена азотистых веществ в растении. Вследствие этого резко снижается и использование азота на синтез белка и замедляется переработка поступающего в растение аммиачного азота на синтез аминокислот. В этом случае одновременно с накоплением экзогенного аммиака (поступающего в растение из питательного раствора) в растении накапливается и эндогенный, образующийся в процессе распада белка аммиак (табл. 9).

Таблица 9

Влияние калия на накопление аммиака в растениях при использовании ими аммиачного источника азота

Продолжительность экспозиции растений на N^{15}, час.	Доза K_2O, г	Аммиачный азот в зеленой массе молодых растений овса, % к содержанию белкового азота		
		общее количество NH_3	непереработанный $N^{15}H_3$, поступивший в растение из меченого удобрения	NH_3, образовавшийся в растении в процессе распада белка
48	0,50	1,93	0,35	1,58
48	0,05	3,39	0,54	2,85
96	0,50	2,53	0,55	1,98
96	0,05	4,73	1,14	3,59
192	0,50	4,23	1,54	2,66
192	0,05	8,35	3,45	4,90

По мере увеличения длительности пребывания растений на питательной смеси с меченым аммиачным азотом процент эндогенного, так же как и экзогенного, аммиака все время возрастает. Вследствие этого при недостатке калия накопление аммиака в растениях достигает таких концентраций, которые уже вызывают явный токсический эффект и в предельном случае — гибель растений от аммиачного отравления. Недостаток калия вызывает снижение интенсивности синтеза и обновления белка также и при нитратном источнике азота. Так, количество обновленного белка при экспозиции растений овса на меченном изотопом N^{15} нитратном азоте в течение 48 часов при недостатке и норме калия составляло соответственно 41 и 30%. Но так как концентрация аммиака в растениях при нитратном источнике азота весьма мала вследствие постепенного восстановления нитратов, то в этом случае недостаток калия хотя и сказывается отрицательно на росте растений, но не вызывает таких катастрофических последствий, как это могло бы быть при аммиачном источнике азота.

Влияние калия на обмен белка, по-видимому, тесно связано с более широкой ролью этого элемента в энергетических про-

цессах в растительной клетке. Еще в наших старых работах указывалось на важную роль калия в окислительно-восстановительных процессах в клетке [1]. В последнее время появляются новые данные о значении концентрации иона калия для окислительного фосфорилирования [6, 7].

Развитие дальнейших исследований роли калия в энергетике растительной клетки представляет поэтому весьма большой интерес.

Заключение

1. При использовании аммонийного азота фосфатные ионы поступают в растение со значительно большей интенсивностью, чем при использовании нитратного азота. На единицу использованного азота в случае внесения его в аммонийной форме в условиях водных или песчаных культур растениями поглощается в 2,5—3 раза больше фосфора, чем при внесении нитратного азота.

Вообще при аммонийном источнике азота все анионы поступают в растения более интенсивно, чем при нитратном азоте, однако влияние ионов аммония намного сильнее сказывается на поступлении фосфатных ионов, чем на поступлении других анионов.

Форма азотного удобрения сравнительно слабо сказывается на поступлении калия в растения.

2. Исследования с применением изотопа N^{15} показали, что при недостаточной концентрации калия в растениях синтез белка и скорость его обновления понижаются. При этом скорость поступающего из удобрения аммиачного азота на синтез аминокислот замедляется и одновременно усиливаются диссимиляционные процессы с образованием аммиака в качестве конечного продукта распада белка. В результате это приводит к аммиачному отравлению растений и соответственно к резкому угнетению их роста.

При использовании нитратного азота концентрация аммиака в растениях весьма мала, и в этом случае растения могут сравнительно нормально развиваться при меньших концентрациях калия, чем это было бы необходимо при аммиачном питании.

3. В практике применения удобрений форма источника азота имеет значение также и для установления оптимальных доз фосфора и калия, прежде всего в условиях культуры растений на беспочвенных средах гидропоники, а также при применении методов локального внесения удобрений в почву.

Указанные закономерности следует учитывать также при определении наиболее целесообразных сочетаний форм питательных веществ в составе сложных и смешанных удобрений.

В частности, сочетание аммонийного азота с растворимой формой P_2O_5 является особенно целесообразным для повыше-

ния коэффициента использования фосфора. Поэтому фосфаты аммония являются более эффективным источником P_2O_5, чем фосфаты кальция.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчин Ф. В. Роль калия и фосфора в использовании растениями нитратного и аммиачного азота. Докл. на сессии АН СССР по почвоведению и агротехнике. М., 1936.
2. Соколов А. В. Полевые опыты с суперфосфатами и другими формами удобрений в Средней Азии. В кн.: «Гранулированный суперфосфат», М., 1955.
3. Опыты с новыми формами фосфатов в географической сети. Тр. Всесоюзн. научно-исслед. ин-та удобрений и агропочвоведения, вып. 7, М., 1963.
4. Dion H. G., Dehm I. E., Spinks J. W. Tracer studies with posphate fertilizers Canadian Chem. and Process Inds. November, 1950.
5. Турчин Ф. В., Плышевская Е. Г., Зерцалов В. В. Исследование азотного обмена растений с применением изотопа N^{15}. Тр. сессии АН СССР по мирному использованию атомной энергии. М., 1955.
6. Latzko E. Zur Rolle des K^+ der oxydative Phosphorylierung. Biochim. et biophys. acta 47, N 2, 1961.
7. Lehininger C. L., Wadkins C. L., Cooper C., Devlin T. M. Gamble. Science, 128, 450, 1958.

О СКОРОСТИ ОБНОВЛЕНИЯ БЕЛКА И ХЛОРОФИЛЛА В ВЫСШИХ РАСТЕНИЯХ*

Поступившие в растения минеральные соединения азота, претерпевая ряд последовательных превращений, в конечном счете идут на синтез белка. При благоприятных условиях переработка в растениях неорганических соединений азота в аминокислоты, амиды и другие небелковые органические соединения азота протекают сравнительно быстро. Так, например, при внесении азотной подкормки в растениях, как правило, можно обнаружить заметное увеличение содержания органических небелковых фракций азота, которое может быть обусловлено только их новообразованием за счет переработки поступившего в растение неорганического азота.

Изменения содержания белков в растениях в первое время после внесения азотной подкормки недостаточно ясны. Часто они не выходят за пределы возможной ошибки опыта. Но даже и в том случае, когда содержание белковых веществ в растениях возросло на доказуемую величину, не всегда можно с достаточным основанием утверждать, что изменение содержания белка произошло в результате переработки внесенного под растение минерального азота. В растении происходит непрерывный обмен веществ, белки распадаются и вновь регенери-

* Статья написана в соавторстве с М. А. Гуминской и Е. Г. Плышевской и опубликована в «Известиях АН СССР», серия биологическая, № 6, 1953.

руются, поэтому регистрируемые изменения могут быть вызваны не только новым синтезом белка, но и рядом других, не вскрытых исследованием, причин. Для того чтобы ответить на вопрос, как быстро поступивший в растение минеральный азот, пройдя цепь промежуточных превращений, трансформируется в азот белка, необходима такая экипировка опыта, которая обеспечивала бы получение прямого ответа на заданный вопрос и исключала возможность иного толкования полученных результатов. Выполнение этого требования в значительной мере облегчается при проведении опытов с использованием меченых атомов азота. Применение этого метода может дать ответ не только на вопрос о том, как быстро неорганический азот, внесенный с удобрением, превращается в азот белка, но при его помощи можно установить также скорость обновления белков в растениях, последовательность или синхронность в образовании отдельных групп белковых веществ.

Выяснение этих вопросов и явилось одной из основных задач наших исследований. Кроме того, представлялось весьма важным выяснить, используя метод меченых атомов, характер тех изменений, которым, по-видимому, подвергается хлорофилл в различных условиях азотного питания растений.

Известно, что при недостатке азота в почве растения имеют бледно-зеленую окраску, при избытке азота — темно-зеленую. Степень интенсивности зеленой окраски растений — это тот признак, по которому можно судить об обеспеченности растений азотом.

Если растениям, испытывающим недостаток в азоте, дать азотную подкормку, то уже через 1—2 дня можно наблюдать заметное усиление у них интенсивности зеленой окраски. Наоборот, удаление азота из питательной среды, как это легко может быть продемонстрировано в водных культурах со сменными растворами, влечет за собой очень быстрое ослабление интенсивности зеленой окраски растений.

Было показано, что изменение интенсивности зеленой окраски растений при меняющихся условиях азотного питания обусловлено различным содержанием в них хлорофилла. С первого взгляда это кажется несколько странным. При содержании хлорофилла в зеленых листьях около 1% в пересчете на сухой вес и азота в хлорофилле около 6,2% общее количество азота хлорофилла составляет около 0,06%, в то время как общее содержание азота в зеленых листьях около 3% (в пересчете на сухой вес). Таким образом, азот хлорофилла составляет всего лишь $^1/_{50}$ долю общего азота листьев. Поэтому, казалось бы, что для образования хлорофилла растения могли бы довольствоваться весьма умеренным количеством азота, и в этом отношении они могли бы быть менее зависимыми от интенсивности снабжения их азотом. В действительности же дело обстоит совершенно по-другому.

Предполагалось, что в растении происходит частое обновление хлорофилла и что его азотистый компонент вовлекается в общий азотный обмен растений.

Для своих исследований мы брали растения из специально заложенных вегетационных опытов. Растения выращивались на соответствующей питательной смеси в условиях песчаных культур. На той или иной стадии развития под растения вносилась азотная подкормка в виде сульфата аммония, обогащенного тяжелым изотопом азота N^{15}. Затем через определенные промежутки времени после внесения азотной подкормки растения убирались, тщательно измельчались (до пастообразного состояния) в фарфоровой ступке; к измельченной массе растений добавлялась дистиллированная вода, и полученная суспензия отжималась через чистую, предварительно промытую в горячей воде, марлю. К отжатой массе измельченных растений вновь добавлялась дистиллированная вода, и полученная взвесь вновь отжималась через марлю. Эта операция повторялась 5—6 раз, до тех пор, пока отжимаемый от взвеси раствор не стал совершенно прозрачным и бесцветным. Полученный коллоидальный раствор нагревался на водяной бане при температуре 80—81°. При этих условиях содержащиеся в растворе белки выпадали в хлопьевидный осадок. Коагулированные белки отфильтровывались через взвешенный безводный фильтр, и после сушки в них определялось содержание азота по Кьельдалю. Общее содержание азота в выделенных таким образом белках колебалось в отдельных пробах в пределах 11—13% N. Несколько пониженное содержание азота в этих белках, по-видимому, обусловлено наличием в них примесей других веществ, осаждающихся вместе с белками. В освобожденной от белков вытяжке из растений (фильтрат) определялись водорастворимые небелковые органические соединения азота, аммиачный азот, а в отдельных опытах — и сахара.

Отжатая и отмытая от всех растворимых веществ масса растений (мезга) высушивалась, и в ней определялось содержание общего азота. Полученные данные должны характеризовать содержание нерастворимых, более устойчивых белков в растении. В зеленых растениях белковые вещества представлены двумя основными группами: конституционными белками протоплазмы (плазменными белками) и запасными белками. Существует представление (Костычев, 1933; Сабинин, 1940; Nightingale, 1937), что конституционные белки протоплазмы обладают очень высокой устойчивостью и слабой изменчивостью. Образуя основной остов протоплазмы, эти группы белков пребывают как бы «в связанном состоянии» (Костычев, 1933) и почти не вовлекаются в азотный обмен в растении. Запасные же белки, наоборот, весьма лабильные соединения. Они обладают большой растворимостью и легко расщепляются протеолитическими ферментами до полипептидов и аминокислот и

в такой форме отводятся в новые точки роста или в запасные органы растений.

Принимая такое подразделение белков зеленых растений, мы должны отнести белки, переходящие в коллоидальный раствор, как более мобильные их формы, к запасным белкам, а нерастворимые белки, содержащиеся в отжатой массе растений, — большей частью к конституционным белкам протоплазмы или, короче, к плазменным белкам.

Следует особо отметить, что определяемые нами нерастворимые белки, по-видимому, не полностью, а только большей частью могут быть отнесены к конституционным белкам, так как нет оснований считать, что при принятой нами методике обработки растительного материала запасные белки переходят в коллоидальный раствор. Но так как в настоящее время не существует такого метода, применение которого позволило бы осуществить полное разделение этих групп белков, то мы условно относим все белки, содержащиеся в измельченной, отжатой и промытой массе растений, к конституционным белкам.

Одновременно в этих же исследованиях производилось определение азота хлорофилла. Для этого измельченные растения обрабатывались этиловым спиртом до полного извлечения хлорофилла. После отгонки спирта хлорофилл отделялся от других компонентов спиртовой вытяжки растворением его в толуоле, так как в толуоле, кроме хлорофилла, не растворяются какие-либо другие азотсодержащие соединения, входящие в состав растений. Аналитическое определение азота хлорофилла производилось по методу Кьельдаля.

Ниже излагаются результаты трех опытов с меченым азотом.

Первый опыт с озимой рожью был заложен в середине июля. Растения выращивались в условиях песчаных культур на нормальной питательной смеси. Для придания среде достаточной буферности к песку добавлялось 2% торфа, предварительно промытого соляной кислотой и водой и потом насыщенного CaO и MgO (10 : 1) до pH 7,0. При набивке сосудов в числе других питательных элементов вносился и азот в виде сульфата аммония в количестве 0,50 г N на сосуд размером 20×20 см (7 кг песка).

Растения в этом опыте развивались совершенно нормально, хорошо раскустились и имели интенсивную зеленую окраску. Через 30 дней после появления всходов сосуды с подопытными растениями были разбиты на две группы: в первой группе растениям была дана азотная подкормка в виде сульфата аммония с пятикратным обогащением тяжелым изотопом азота N^{15}. Доза азота при подкормке была установлена 0,25 г на сосуд. Растения во второй группе сосудов были оставлены без азотной подкормки (контрольные варианты). Через 24 часа после

внесения азотной подкормки с меченым азотом растения убирались и сразу же направлялись на анализ. Отдельно анализировались корни и надземная масса растений. Результаты химического анализа приведены в таблице 1.

Из данных таблицы следует, что через 24 часа после дачи азотной подкормки не было обнаружено сколько-нибудь заметных изменений в весе растений: контрольные и подкормленные растения имели примерно одинаковый вес. Но в химическом составе растения влияние азотной подкормки, несмотря на столь непродолжительный срок после внесения, сказалось все же достаточно заметно. Сопоставляя данные анализа надземной массы и корней, можно прийти к заключению, что масштаб изменений для отдельных фракций азота в корнях и надземной массе растений различен. Для корней внесение азотной подкормки наиболее резко сказалось на содержании небелковых фракций азота и значительно слабее на содержание запасных и конституционных белков. Для зеленой надземной массы, наоборот, под влиянием подкормки более заметно возросло содержание белковых фракций и менее значительные изменения произошли в содержании небелкового азота. Очевидно, синтез белков происходит с большей интенсивностью в зеленых надземных органах растений, чем в корнях. Переработка же неорганического азота в аминокислоты, амиды и другие небелковые органические соединения происходит достаточно интенсивно как в корнях, так и в надземных органах растений.

Содержание дисахаридов в растениях при внесении азотной подкормки заметно упало, что, очевидно, обусловлено потреблением сахаров в процессе синтеза белка в растениях.

Выделенные из зеленой надземной массы растений отдельные фракции азотистых соединений после их минерализации и восстановления до элементарного азота на специальной вакуумной установке были подвергнуты изотопному анализу на масспектрографе.

Результаты анализа приведены в таблице 2.

Приведенные в таблице данные дают точные сведения об использовании внесенного в подкормку меченого азота на построение отдельных органических соединений в растении.

Мы видим, что максимальное содержание меченого азота было найдено в небелковых водно- и спирторастворимых органических соединениях азота (аминокислоты и амиды), где было обновлено около 20% всего азота этих фракций.

Из двух групп белковых веществ конституционные белки были почти в 4 раза богаче меченым азотом, чем белки запасные. Эти данные служат прямым доказательством того положения, что весь процесс переработки неорганического азота (в данном случае аммиачного азота) в белки протекает в растениях очень быстро, при этом в первую очередь происходит

Таблица 1

Содержание отдельных фракций азота и сахара в растениях озимой ржи без азотной подкормки и через 24 часа после внесения азотной подкормки

(песчаные культуры)

	сырой вес на сосуд, г	В в мг на 100 г сырой массы растений							
		дисахариды в мг на 100 г сырой массы	небелковый водорастворимый азот	небелковый спирторастворимый азот	NH_3	омыляемый азот	азот запасных белков	азот конституционных белков	азот хлорофилла
1. Зеленая масса									
Контрольные растения без подкормки	86,0	2750	77,0	49,0	Нет	16,6	135,3	160,0	10,7
Растения через 24 часа после внесения 0,25 г N в $(NH_4)_2 SO_4$	84,6	2370	91,0	60,2	Нет	22,1	150,0	175,0	10,9
2. Корни									
Контрольные растения	131	—	19,7	Не определялся	Нет	4,6	19,8	79,6	—
Растения через 24 часа после внесения 0,25 г N $(NH_4)_2 SO_4$	137	—	35,6	Не определялся	Нет	15,2	25,2	84,5	—

Таблица 2

Изотопный анализ отдельных фракций азота, выделенных из зеленой массы озимой ржи через 24 часа после внесения азотной подкормки в форме $(NH_4)_2SO_4$ с 5-кратным обогащением N^{15}

Выделенные из растений фракции азота	Найденное обогащение в отношении N^{15}	Содержание меченого азота, в процентах к общему азоту фракции
Водорастворимый небелковый азот	1,83	20,75
Спирторастворимый небелковый азот	1,79	19,75
Азот запасных белков	1,05	1,25
Азот конституционных белков	1,19	4,75
Азот хлорофилла	1,38	9,5

образование конституционных белков. Запасные же белки синтезируются после образования конституционных белков.

Также весьма значительное содержание меченого азота было обнаружено в хлорофилле, хотя за истекшие 24 часа после внесения азотной подкормки содержание хлорофилла в растениях практически не изменилось.

Полученные данные о распределении меченого азота между отдельными фракциями азотистых веществ в растении нельзя, однако, рассматривать как непосредственные показатели обновления азотистого состава для всех выделенных фракций. Есть все основания считать, что только для водорастворимых и спирторастворимых небелковых азотистых соединений, являющихся первичными продуктами переработки аммиака в растениях, найденное обогащение меченым азотом соответствует действительному обновлению азотистого состава этих фракций.

Совершенно иначе обстоит дело для белковых веществ и для хлорофилла, на построение которых используется не непосредственно аммиачный азот, а азот, уже переработанный в растении в органические соединения — аминокислоты, предшественники белка и хлорофилла *. И если мы хотим, используя данные изотопного анализа, установить действительное обновление азотистого состава белковых фракций и хлорофилла, то мы должны принять для этих фракций в качестве непосредственного источника азота не азот сульфата аммония, который был внесен в подкормку, а водорастворимый небелковый органический азот, т. е. именно тот азот, который непосредственно используется на построение белка и хлорофилла. Следова-

* Работами Т. Н. Годнева экспериментально доказано, что природное ядро хлорофилла синтезируется в растениях из аминокислот (доклад на конференции по фотосинтезу в Отделении биологических наук АН СССР 11—14 мая 1953).

тельно, мы должны в дальнейших расчетах принять для этих фракций в качестве исходного положения не 5-кратное обогащение в отношении N^{15}, которое было у азота сульфата аммония, использованного для подкормки, а не более чем 1,83-кратное, т. е. то обогащение тяжелым изотопом, которое экспериментально было найдено во фракции водорастворимого небелкового органического азота. При таком логически необходимом условии степень обновления азотистого состава белковых фракций и хлорофилла для этого опыта представляется в следующем виде (табл. 3).

Таблица 3

Степень обновления азотистого состава для различных фракций азотистых органических веществ в растении после 24-часовой экспозиции на аммиачном азоте, обогащенном N^{15}

Фракция азота	Найденное обогащение N^{15}	Процент обновленного азота во фракции (за исходную величину принято обогащение N^{15} водорастворимой небелковой фракции азота)
Водорастворимый небелковый органический азот	1,83	20,75
Азот запасных белков	1,05	6,03
Азот конституционных белков	1,19	23,0
Азот хлорофилла	1,38	45,8

Таким образом, за 24 часа, истекшие после внесения азотной подкормки, произошло значительное обновление азотистого состава конституционных белков и хлорофилла. Это обновление произошло не только за счет дополнительного притока азота для нового синтеза этих соединений, но и в результате процессов обмена веществ, непрерывно происходящих в растении. Если принять вычисленный нами процент обновления азота, то в абсолютных величинах общее количество обновленного азота в конституционных белках и хлорофилле выразится в следующих цифрах:

1) для конституционных белков при общем содержании в них азота 175 мг и 23% обновленного азота — 40,25 мг (обновленного азота);

2) для хлорофилла при общем содержании в нем азота 10,9 мг и 45,8% обновленного азота — 4,99 мг.

В то же время, как следует из данных таблицы 1, увеличение в содержании этих фракций азота в подкормленных растениях по сравнению с контрольным вариантом для азота конституционных белков составляет всего 15 мг (175—160 мг) N, а для азота хлорофилла — только 0,2 мг (10,9—10,7 мг) N.

Следовательно, констатированное в этом опыте увеличение в содержании азота конституционных белков и хлорофилла выражается в несколько раз меньшей величиной в сравнении с количеством обновившегося за опытный период азота этих соединений *.

Отсюда прежде всего вытекает, что существовавшее ранее представление об относительной стабильности конституционных белков неверное и должно быть отвергнуто. Конституционные белки вовлекаются в общий обмен веществ в растении и непрерывно обновляются.

Другим бесспорным фактом является то положение, что хлорофилл постоянно обновляется в растении. В организме растений молекулы хлорофилла не являются сколько-нибудь долговечными. Они быстро разрушаются и столь же быстро синтезируются.

Азотистый компонент хлорофилла, освобождающийся в процессе его разрушения, возможно, играет значительную роль в синтезе белка в растениях. В пользу такого предположения можно привести установленные в последние годы факты о связи между процессом фотосинтеза и синтеза белка в растениях (Ничипорович, 1950; Осипова и Тимофеева, 1949; Табенцкий, 1953).

Второй опыт с озимой рожью был заложен в начале августа в условиях песчаных культур. Методика проведения опыта была та же, что и предыдущего опыта, с той только разницей, что при набивке сосудов сульфат аммония вносился не в нормальной, а в пониженной дозе, а именно 0,05 г N на сосуд. В этом опыте мы ставили себе цель проследить при помощи меченых атомов превращение аммиачного азота в растениях на более ранних стадиях их развития, поэтому необходимо было, чтобы к моменту подкормки меченым азотом в питательной среде не оставалось не использованного растениями азота обычного сульфата аммония, вносимого перед посевом растений.

Через 15 дней после появления всходов была внесена азотная подкормка в виде сульфата аммония с 3-кратным обогащением N^{15}. Уборка растений для анализа производилась через 2; 4; 24; 48 и 96 часов после внесения подкормки с меченым азотом.

---

* Следует отметить, что приведенные здесь величины обновленного азота для белковых фракций и хлорофилла, вероятно, значительно приуменьшены, так как при их вычислении мы исходим из степени обогащения небелковой фракции азота к моменту окончания опыта (через 24 часа после внесения подкормки с меченым азотом). Но синтез белка и его превращение в растениях происходили и в более ранние сроки, когда обогащение тяжелым изотопом азота небелковой азотистой фракции, идущей на синтез белка, было более низким. Поэтому рассчитанные величины обновленного азота в белках и хлорофилле следует рассматривать как минимальные.

Результаты учета урожая и химического анализа растений приведены в таблице 4.

Таблица 4

Вес молодых растений озимой ржи и содержание в них различных фракций азота при различных сроках уборки растений после внесения азотной подкормки в виде сульфата аммония с 3-кратным обогащением N^{15}

Сроки уборки растений после внесения подкормки через	Сырой вес растений, г/сосуд	Надземная зеленая масса (N в мг на 100 г сырого веса растений)		
		небелковый органический азот	азот запасных белков	азот конституционных белков
2 часа	9,1	55,6	174,0	133,0
4 „	10,7	62,6	160,0	152,6
24 „	9,3	84,0	128,8	142,4
48 часов	7,9	181,0	154,8	203,2
96 „	9,4	148,4	188,1	241,0

В первые 24 часа после внесения азотной подкормки доказуемых изменений в содержании запасных и конституционных белков, определяемых обычным химическим методом, в растении не было обнаружено. За это время достаточно заметно увеличилось содержание в растении небелковой фракции азота. В последующие сроки уборки через 48 и 96 часов после внесения азотной подкормки общее содержание небелкового азота и азота конституционных белков резко возросло, но содержание запасных белков и в эти сроки осталось примерно на том же уровне. На основании этих данных, если не привлекать к подобным исследованиям метода меченых атомов, можно было бы сделать вывод о том, что внесенный в подкормку азот использовался в растении на синтез органических небелковых соединений азота и конституционных белков. Что же касается запасных белков, то на их образование азотная подкормка не оказала влияния.

Применение меченых атомов азота позволяет вскрыть ошибочность такого заключения. К сожалению, в рассматриваемом опыте по техническим причинам не был произведен изотопный анализ небелковой органической фракции азота, а имеются лишь данные изотопного анализа запасных и конституционных белков. Эти данные приведены в таблице 5.

Эти данные позволяют прежде всего ответить на вопрос о продолжительности периода, необходимого для превращения поступающего из почвы аммиачного азота в азот белка зеленых частей растений. В условиях этого опыта меченый азот в конституционных белках был обнаружен через 4 часа после внесения подкормки. В белках растений, снятых через 2 часа после

Таблица 5

Результаты изотопного анализа отдельных фракций белкового азота, выделенных из зеленой массы озимой ржи в различные сроки после внесения азотной подкормки с 3-кратным обогащением в отношении N^{15}

Сроки уборки растений после внесения подкормки через	Найденное обогащение тяжелым изотопом азота N^{15}		Процент меченого азота (3-кратное обогащение N^{15}) к общему азоту фракции	
	азот запасных белков	азот конституционных белков	азот запасных белков	азот конституционных белков
2 часа	1*	1	0	0
4 „	1	1,17	0	8,5
24 „	1	1,24	0	12,0
48 часов	2,02	1,96	51,2	48,0
96 „	2,45	2,55	72,8	77,4

* За 1 принято естественное соотношение N^{14} и N^{15} в природе.

внесения подкормки, меченого азота еще не было найдено. Следовательно, весь цикл превращения аммиачного азота в азот белка, включая и передвижения азота от почвенного раствора до листьев растений, совершается в очень короткий срок — между двумя и четырьмя часами. Из этих данных следует также, что в растении вначале синтезируются конституционные белки протоплазмы, образование же запасных белков происходит позже. Этот вывод согласуется с результатами предыдущего опыта.

При обсуждении результатов химического анализа растений мы указывали, что по этим данным невозможно было установить какие-либо закономерности в изменении содержания запасных белков в растениях при различных сроках их уборки. Результаты изотопного анализа, наоборот, указывают на сильное обновление азота этих белков через 48 и 96 часов после внесения подкормки с меченым азотом. Это заставляет нас признать, что в действительности запасные белки, так же как и конституционные, подвергались непрерывным изменениям в организме растений. И если в первые сроки после уборки изотопный состав азота запасных белков не менялся, то это не основание для того, чтобы делать вывод об известной их устойчивости в эти сроки опыта.

Нельзя рассматривать запасные и конституционные белки как совершенно обособленные и не взаимодействующие между собой группы белковых веществ.

Тот факт, что меченый азот в конституционных белках появляется раньше, чем в запасных, можно рассматривать как доказательство того положения, что новый синтез белка происходит в протоплазме. Плазменный, конституционный белок, претерпевая соответствующие изменения, превращается в более

подвижную форму — запасной белок. Можно предполагать, что конституционный белок не сразу после своего образования превращается в запасной белок. Очевидно, каждая молекула плазменного белка имеет некоторую продолжительность жизни. И так как обновляются более «старые» молекулы конституционного белка протоплазмы, то понятно, почему в первые часы после подкормки растений в запасных белках не было меченых атомов азота.

Эти белки обязаны своим происхождением более старым молекулам конституционных белков, синтезировавшимся еще без участия меченых атомов. И только в более поздние сроки уборки, когда истекал срок жизни тех молекул конституционных белков, которые синтезировались с участием меченых атомов азота, мы могли обнаружить меченый азот и в запасных белках.

Полученные в этом опыте данные (см. табл. 5), свидетельствуя о высокой интенсивности обмена белков в организме растений, одновременно дают также представление о продолжительности жизни белковых молекул в молодых растениях озимой ржи.

Так как за 24 часа, прошедших между третьим и четвертым сроком уборки, содержание меченого азота в запасных белках возросло с нуля до 51,2% при почти неизменившемся общем количестве этих белков, что можно считать, что продолжительность жизни белковых молекул в этих условиях измеряется несколькими часами.

Третий опыт с применением меченого азота был проведен со щавелем. Выбор этого растения определялся особенностями его азотного обмена, в частности значительной ролью в этом обмене органических кислот. Методика проведения опыта та же, что и ранее описанных опытов.

Семена садового щавеля высевались в сосуды на нормальную питательную смесь с умеренной дозой азота (0,30 г N на сосуд) в виде сульфата аммония. Взошедшие растения хорошо развивались. После того как проведением соответствующих испытаний было установлено, что почти весь азот, внесенный с питательной смесью, использовался растениями, производилась подкормка подопытных растений сульфатом аммония с меченым азотом.

В опыте со щавелем, так же как и в первом опыте с озимой рожью, для подкормки использовался препарат сульфата аммония с 5-кратным обогащением тяжелым изотопом азота N^{15}. Доза азота для подкормки была принята 0,25 г N на сосуд с 7 кг песка. Через 72 часа после внесения подкормки растения снимали и направляли на анализ. Одновременно снимали и анализировали контрольные растения, под которые не вносилась подкормка. Данные учета урожая растений и их химического анализа приведены в таблице 6.

Таблица 6

Вес надземной массы щавеля и содержание в нем различных фракций азота

	Вес зеленой массы, г/сосуд	Мг N на 100 г сырой зеленой массы растений		
		небелковый	азот запасных белков	азот хлорофилла
		органический азот		
Без подкормки (контроль)	48,9	111,3	60,0	15,9
Через 72 часа после внесения азотной подкормки	50,2	124,5	65,0	20,9

В условиях этого опыта азотная подкормка вызывала небольшое увеличение содержания в растениях небелкового органического азота и азота запасных белков; более резкие изменения произошли в содержании азота хлорофилла. Вес растений за опытный период практически не изменился.

Данные изотопного анализа отдельных фракций азота для растений, получавших азотную подкормку, приведены в таблице 7.

Таблица 7

Изотопный анализ отдельных фракций азота, выделенных из растений щавеля через 72 часа после внесения азотной подкормки с меченым азотом (5-кратное обогащение в отношении N^{15})

Фракция азота	Найденное обогащение в отношении N^{15}	Содержание меченого азота в процентах к общему азоту фракции	Процент обновленного азота во фракции
Небелковый органический азот	2,44	36,6	36,6
Азот запасных белков	1,45	11,3	31,2
Азот хлорофилла	2,38	34,5	95,8

В этом опыте примерно одинаковое обогащение тяжелым изотопом азота обнаружено для небелкового органического азота и для азота хлорофилла. Значительно меньше (примерно в 3 раза) обогащение в отношении N^{15} обнаружено для азота запасных белков. При исчислении процента обновленного азота в отдельных фракциях мы, так же как и при разборке первого опыта с озимой рожью, исходили из положения, что непосредственным предшественником для синтеза белка и хло-

рофилла является не исходный минеральный азот, а азот, переработанный в растении в небелковые органические азотные соединения (аминокислоты); поэтому изотопный состав азота этой фракции и был принят в качестве исходного при вычислении процента обновленного азота белка и хлорофилла.

Из приведенных расчетов следует, что в этом опыте азот хлорофилла за 72 часа после внесения азотной подкормки почти полностью обновился (95,8%). Таким образом, данные, полученные в этом опыте, так же как и соответствующие данные первого опыта с рожью, показывают, что хлорофилл постоянно обновляется в растении и что продолжительность жизни молекулы хлорофилла весьма незначительна.

В этом опыте обновление запасных белков происходило менее интенсивно, чем в предыдущем с рожью, что, по-видимому, обусловлено особенностями метаболизма щавеля.

Обновление белка в растениях происходит в результате непрерывных процессов обмена веществ и одновременных процессов распада и синтеза белковых веществ. В процессе обновления белка суммарное его количество в растении в известных границах может оставаться более или менее постоянным. Если, например, исключить из питательной среды азот, то абсолютное содержание белка в растении, несмотря на постоянное его (белка) самообновление в течение известного времени, будет близким к одной и той же величине. При снабжении растений азотом одновременно с обновлением ранее синтезированных белков происходит и новый синтез белка, в результате которого общее содержание белка в растении возрастает. Новый синтез белка, который мы здесь рассматриваем как интегральное наращивание количества белка в растении, требует для осуществления известного времени.

При внесении азотной подкормки через очень короткие промежутки времени после дачи растениям азота мы можем констатировать значительное увеличение содержания в растениях аминокислот при почти неизменившемся содержании белка. Только спустя некоторое время после того, как было обнаружено значительное возрастание свободных аминокислот, происходит и возрастание содержания белка в растении.

Таким образом, первичный синтез аминокислот и первичный синтез белка в растении разделены известным промежутком времени. В рассмотренных выше опытах с молодыми растениями озимой ржи резкое увеличение небелковой органической фракции азота было обнаружено в растениях через 24 часа после внесения азотной подкормки. Но значительное возрастание содержание белка в растениях в этом опыте было обнаружено только через 48 часов после внесения азотной подкормки (см. табл. 4).

Проведенные нами исследования показали, что новый синтез белка сопровождается одновременной убылью сахаров в ра-

стениях. В таблице 8 приведены результаты анализов молодых растений на содержание в них различных фракций азота и сахаров через определенные промежутки времени после внесения азотной подкормки. До внесения азотной подкормки растения получали пониженную дозу азота.

Таблица 8

Влияние азотной подкормки на содержание белкового и небелкового азота и сахаров в молодых растениях овса (водные культуры)

Результаты перечислены на 100 г сырого веса растений

Время, истекшее после внесения подкормки (NH_4NO_3), час.	Органический небелковый N, мг		Растворимый белковый N, мг		Моносахариды, г		Дисахариды, г	
	подкормка	контроль (без подкормки)	подкормка	контроль	подкормка	контроль	подкормка	контроль
4	90	69	51	57	0,56	0,58	4,26	4,24
24	207	76	63	67	0,70	0,60	3,92	4,20
48	288	42	84	65	0,52	0,61	3,32	4,48
96	487	62	110	64	0,44	0,65	1,40	4,03

В этом опыте увеличение небелкового органического азота в растениях было уже заметно через 4 часа после внесения азотной подкормки: через 24 часа содержание небелкового органического азота возросло более чем в 3 раза по сравнению с неподкормленными растениями, но содержание белкового азота практически не изменилось. Также почти без изменений осталось и содержание сахаров в растениях. Только через 48 часов, когда было обнаружено значительное увеличение белкового азота в подкормленных растениях, содержание дисахаридов сразу упало примерно на 30% по сравнению с неподкормленными растениями. Через 96 часов, когда содержание белка в подкормленных растениях примерно удвоилось, содержание дисахаридов в этом случае стало в 3 раза меньше, чем в контрольных растениях. В то же время содержание моносахаридов в растениях сравнительно мало изменилось. Аналогичные данные были получены и в ряде других опытов.

Мы приведем только результаты опытов с молодыми растениями овса, где изучалось влияние подкормки нитратным и аммиачным азотом (табл. 9).

В этом опыте при внесении азотной подкормки в аммиачной форме содержание небелкового органического азота в растениях было намного выше по сравнению с вариантами, где азотная подкормка вносилась в нитратной форме. Особенно большие различия наблюдались для более поздних сроков анализа. Столь значительные различия в содержании небелкового азота в растениях, получавших азотную подкормку в аммиачной или

Таблица 9

Влияние аммиачной и нитратной подкормки на содержание в молодых растениях овса сахаров, белкового и небелкового органического азота (водные культуры)

Результаты перечислены на 100 г сырого веса растений

Время, истекшее после внесения азотной подкормки, час.	Форма азота при подкормке	Органический небелковый азот, мг	Растворимый белковый азот, мг	Моносахариды, г	Дисахариды, г
12	Без подкормки	147	92	0,64	5,84
	Аммиачная	210	98	0,73	5,45
	Нитратная	190	97	0,52	5,77
36	Без подкормки	131	100	0,65	5,92
	Аммиачная	217	157	0,56	4,06
	Нитратная	168	152	0,52	2,88
72	Без подкормки	147	85	0,59	5,15
	Аммиачная	652	197	0,48	2,32
	Нитратная	221	191	0,30	2,37

в нитратной форме, ни в какой степени не отразились на содержании белка в растениях. Изменения содержания белка, прошедшие в результате азотной подкормки, независимо от формы азота в подкормке, аммиачной или нитратной, были совершенно одинаковы. Значительное увеличение содержания белка было обнаружено во второй срок анализа — через 36 часов после внесения подкормки, и в этот же срок наблюдалось резкое падение дисахаридов в растениях.

В следующий срок анализа — через 72 часа — было констатировано дальнейшее нарастание белка и одновременно еще бóльшая убыль дисахаридов. Что касается моносахаридов, то их содержание заметно падает в растении под влиянием азотной подкормки только в более поздние сроки анализа.

Таким образом, новый синтез белка в растениях сопровождается значительным расходованием сахаров, в первую очередь дисахаридов. Это дает основания считать, что сахара играют бóльшую роль в процессе синтеза белка в растениях. При современном состоянии вопроса эта роль еще недостаточно ясна. Можно строить лишь те или иные предположения. Можно сделать допущение, что нативный белок в растениях находится в какой-то, может быть, весьма лабильной связи с сахарами. С другой стороны, можно допустить, что процесс синтеза белка сопровождается интенсивным окислением сахаров, в результате которого освобождается энергия, необходимая для активации молекул, вступающих в реакцию синтеза белка, как это было высказано в свое время А. В. Благовещенским (1936).

Выводы

Исследование изотопного состава различных фракций азота, выделенных из растений через определенные промежутки после внесения азотной подкормки с меченым атомом, позволило вскрыть следующие закономерности в синтезе и обмене белка и хлорофилла в растениях.

1. Синтез белка в растении начинается с образования конституционных белков протоплазмы. В опытах с молодыми растениями ржи меченый азот был обнаружен в конституционных белках уже через 4 часа после внесения подкормки с меченым азотом.

Запасные белки образуются в результате превращения конституционных белков.

2. Существовавшее ранее представление об относительной стабилизации конституционных белков неправильное. Конституционные белки протоплазмы вовлекаются в общий обмен веществ в организме растений и непрерывно обновляются. В соответствии с полученными в опыте данными можно считать, что средняя продолжительность жизни белковой молекулы в молодых растениях озимой ржи исчисляется несколькими часами.

3. Процесс нового синтеза белка сопровождается одновременной убылью дисахаридов в растениях, что дает основания предполагать возможность участия дисахаридов в образовании белка в растениях.

4. Хлорофилл постоянно обновляется в растениях; молекулы хлорофилла не являются сколько-нибудь долговечными: они быстро разрушаются и вновь синтезируются. В опытах с озимой рожью азот хлорофилла обновлялся примерно наполовину за 24 часа после внесения подкормки с меченым азотом. В опытах со щавелем практически полное обновление азота хлорофилла (95,8%) произошло за 72 часа. Возможно, что азотистый компонент хлорофилла, освобождающийся в процессе его обновления, играет какую-то роль в синтезе белка в растении.

ЛИТЕРАТУРА

Благовещенский А. В. К вопросу об условиях синтетических процессов в растительном организме. Тр. Московск. Дома ученых, I. 1936.

Костычев С. П. Физиология растений, 1933.

Ничипорович А. А. Основные проблемы фотосинтеза. Проблемы ботаники. Изд. АН СССР, 1950.

Осипова О. П. и Тимофеева И. В. Исследование белков хлоропластов. ДАН СССР, 67, 1, 1949.

Сабинин Д. А. Минеральное питание растений, 1940.

Табенцкий А. А. К вопросу об управлении процессами образования зеленых пластид. Известия АН СССР, сер. биол. № 1, 1953.

Nightingale G. The nitrogen nutrition of green plants. Bot. rev. 3, 1937.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЗОТНОГО ОБМЕНА РАСТЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗОТОПОВ АЗОТА N^{15} *

Применение стабильного изотопа азота N^{15} в биохимических исследованиях имеет то неоспоримое преимущество перед радиоактивными индикаторами, что он по своему действию на живой организм в любой концентрации ничем не отличается от обычного азота.

Применяя обычные химические методы анализа растений, мы часто не обнаруживаем закономерных изменений в количественном содержании отдельных азотистых веществ в растениях на протяжении какого-то промежутка времени.

Так, например, в одном из наших опытов с молодыми растениями овса через 24 часа после внесения азотной подкормки с 5-кратным обогащением N^{15} общее содержание аминокислотного азота составляло 75 мг на 100 г сырой зеленой массы растений, в контрольных же растениях (без азотной подкормки) было 71 мг аминокислотного азота. Если судить только по этим данным, то можно прийти к выводу, что азотная подкормка за 24 часа не оказала существенного влияния на образование аминокислот в растении. Вопреки этому изотопный анализ показал, что выделенный из подкормленных растений азот аминокислот содержит значительный избыток атомов N^{15}. Экспериментально найденное обогащение этой фракции азота изотопом N^{15} было равным 1,95. Отсюда следует, что за истекшие 24 часа после внесения азотной подкормки аминокислотный состав растений обновился на 23,75% **. Это значит, что по крайней мере 23,75% от общего количества свободных аминокислот в растении было вновь синтезировано за 24 часа опыта. И если химический анализ не смог этого обнаружить, то только потому, что в результате непрерывно происходящего в растении обмена веществ аминокислоты использовались на синтез белка, хлорофилла и общее содержание их в растении в течение опытного периода было близким к исходной величине.

Применение в качестве азотной подкормки сульфата аммония, меченного изотопом N^{15}, в наших исследованиях (1) позволило установить, что в молодых растениях (рожь, щавель) непрерывно происходит весьма интенсивное обновление азотистого состава белка и хлорофилла.

---

* Статья написана в соавторстве с М. А. Гуминской и Е. Г. Плышевской и опубликована в журнале «Физиология растений», т. 2, № 1, 1955.

** Процент обновленного азота вычисляется по формуле: % обновленного $N = \frac{A_1 - 1}{A - 1} \cdot 100$, где A — степень обогащения исходного азота (в данном случае 5), A_1 — экспериментально найденная степень обогащения изотопом N^{15} **исследуемого** соединения азота (в данном случае 1,95); за единицу принято содержание изотопа N^{15} в обычном азоте (0,39%).

Существовавшее ранее представление об относительной стабильности конституционных белков растений оказалось неправильным. Конституционные белки протоплазмы, так же как и запасные вегетативные белки, вовлекаются в общий обмен веществ в организме растений и непрерывно обновляются.

В настоящем сообщении излагаются результаты дальнейших исследований азотного обмена растений с применением меченых атомов азота.

Растения для этих исследований выращивались в торфопесчаных культурах в условиях вегетационного павильона. Питательная смесь, вносившаяся до посева растений, включила 0,3 г N на сосуд (6 кг песка) в форме обычного сульфата аммония и все остальные элементы в нормальных их дозах. В соответствующие стадии развития растениям давалась азотная подкормка в форме сульфата аммония, обогащенного изотопом N^{15}. Продолжительность экспозиции растений на внесенной подкормке, меченной N^{15}, варьировала в отдельных опытах от 6 до 120 часов. По истечении установленного срока экспозиции растения убирались, взвешивались и поступали на анализ. Одновременно в те же сроки производилась уборка растений из контрольных вариантов, где не применялась подкормка меченым азотом. Методика выделения из растений отдельных азотистых фракций ранее описана [1].

В первом опыте с овсом подкормка меченым азотом производилась через 24 дня после появления всходов сульфатом аммония с 3-кратным обогащением N^{15} в дозе 0,24 г N на сосуд.

В таблице 1 приводятся данные учета урожая зеленой массы растений и содержания в нем различных фракций азота по отдельным вариантам опыта.

Из этих данных следует, что по мере удлинения сроков после внесения азотной подкормки содержание почти всех фракций азота в растениях в общем повышается, хотя в отдельных случаях эта картина несколько нарушается. Последнее, по-видимому, может быть объяснено динамичностью процессов азотного обмена в растениях — образованием одних форм азотистых соединений в растениях за счет распада других азотистых веществ.

В таблице 2 приводятся данные изотопного анализа различных фракций азота, выделенных из зеленой массы молодых растений овса в этом опыте.

Из данных таблицы 2 видно, что поступивший в растение минеральный азот (NH_3) включается в состав отдельных органических азотистых соединений в известной последовательности. Вначале происходит синтез небелковых азотистых органических соединений (аминокислоты, амиды), образование же белков происходит несколько позже. При этом из двух групп белковых веществ конституционные белки синтезируются зна-

Таблица 1

Урожай зеленой массы овса и содержание в нем отдельных фракций азота в различные сроки после внесения подкормки с меченым азотом

Сроки уборки растений после внесения подкормки с N^{15}, час.	Вес зеленой массы растений, г/сосуд	Азот отдельных фракций в урожае зеленой массы растений, мг/сосуд				
		органический небелковый	запасных белков	конституционных белков	хлорофилла	неорганических соединений (NH_3 и др.)
6	49,1	54,0	81,0	127,0	5,8	Нет
12	48,3	64,5	78,0	131,0	5,8	„
24	52,6	75,4	82,0	135,0	6,2	„
36	52,3	80,1	94,0	139,0	6,3	„
48	50,0	76,0	106,5	146,0	6,7	„
72	49,0	90,0	94,0	158,0	5,8	„
120	68,9	95,0	156,0	148,0	8,9	„
Контрольные варианты без азотной подкормки						
6	49,0	50,0	76,0	124	5,9	„
72	56,0	62,0	69,0	117	6,2	„

Таблица 2

Результаты изотопного анализа отдельных фракций азота, выделенных из массы молодых растений овса

Продолжительность экспозиции растений на сульфате аммония с 3-кратным обогащением N^{15}, час.	Найденное обогащение изотопом N^{15}				Содержание меченого азота* в процентах к общему азоту фракции			
	органический небелковый азот	азот запасных белков	азот конституционных белков	азот хлорофилла	органический небелковый азот	азот запасных белков	азот конституционных белков	азот хлорофилла
6	1,07	1,0	1,0	1,0	3,5	0	0	0
12	1,32	1,06	1,13	1,07	16,0	3,0	6,5	3,5
24	1,53	1,13	1,28	1,14	26,5	6,5	14,0	7,0
36	1,82	1,15	1,46	1,36	41,0	7,5	23,0	18,0
48	1,75	1,28	1,47	1,43	37,5	14,0	23,5	21,5
72	1,85	Не определяли	1,77	1,81	42,5	—	38,5	40,5
120	1,93	1,85	1,96	Не определяли	46,5	42,5	48,0	—

* Содержание меченого азота выражено в пересчете на 3-кратное обогащение N^{15}, т. е. за 100% принято обогащение изотопов N^{15}, взятого для подкормки сульфата аммония.

чительно быстрее, чем запасные белки. Такое заключение полностью совпадает с результатами ранее проведенных нами исследований с молодыми растениями озимой ржи.

Полученные в этом опыте данные свидетельствуют и о том что в растениях, помимо нового синтеза белков и хлорофилла,

происходит непрерывное обновление азотистого состава «старых» молекул белка и хлорофилла. Это прежде всего следует из того, что относительное содержание меченого азота в конституционных белках и хлорофилле значительно превышает те изменения, которые произошли в общем содержании азота этих фракций после внесения подкормки с меченым азотом.

Приведенные в таблице 2 данные о содержании меченого азота в белках и хлорофилле не выражают, однако, действительной степени обновления этих фракций, которая в действительности намного выше.

При составлении этой таблицы для вычисления процентного содержания меченого азота в исследуемой фракции за 100% принималась величина обогащения изотопом N^{15} сульфата аммония, применявшегося для подкормки, т. е. в данном случае 3-кратное обогащение N^{15}. Такой способ определения степени обновления азота в исследуемых фракциях будет правильным только применительно к аминокислотам и амидам, на синтез которых непосредственно используется аммиачный азот сульфата аммония, внесенного в качестве подкормки. Но на построение белков и хлорофилла идет не аммиак как таковой, а продукты его превращения, и прежде всего аминокислоты.

При вычислении степени обновления азота этих соединений мы должны исходить не из степени обогащения изотопом N^{15} сульфата аммония, взятого для подкормки, а из степени обогащения изотопом N^{15} небелковых органических соединений азота, которые непосредственно используются для синтеза белка и хлорофилла.

При таком логически необходимом условии вычисление действительной степени обновления белков и хлорофилла на каждый данный момент все же представляет то затруднение, что мы не знаем, какова была степень обогащения N^{15} у непосредственных предшественников этих веществ в тот именно момент, когда они были вовлечены в синтез белка и хлорофилла. Если мы производим определение степени обогащения изотопом N^{15} для всех фракций азота в один и тот же срок, то нельзя упускать из виду, что синтез белка и хлорофилла и их превращения в растениях непрерывно происходили в течение всего предшествующего периода, когда степень обогащения небелковой фракции азота, идущей на синтез белка и хлорофилла, была другой.

На первых порах после внесения азотной подкормки, в результате интенсивно идущего синтеза аминокислот за счет непрерывно поступающего в растение меченого источника азота, происходит постоянное возрастание степени обогащения изотопом N^{15} небелковой фракции. В этом случае мы можем сказать, что степень обновления белков и хлорофилла, рассчитанная по данным изотопного анализа соответствующих фрак-

ций азота, выделенных из растений в один и тот же срок, заведомо приуменьшена против действительной.

Однако в какой-то момент в результате непрерывно происходящих процессов обновления белка в небелковую фракцию азота наряду с меченым азотом, поступающим из почвы, попадает в большем или меньшем количестве и небелковый азот, образовавшийся в результате распада белковых молекул, синтезированных в более ранние сроки, еще без участия меченого азота. Следовательно, может оказаться, что в этот момент степень обогащения изотопом N^{15} небелковой фракции будет ниже, чем она была за некоторое время до этого. В этом случае вычисление степени обновления белка по данным изотопного анализа одновременно выделенных небелковой и белковой фракций азота даст преувеличенные результаты, так как какая-то часть белковых молекул была синтезирована в тот момент, когда степень обогащения предшественника белка — небелковой фракции была выше, чем в момент взятия пробы.

Таким образом, вычисляя степень обновления белка и пиррольного ядра хлорофилла путем отнесения найденных величин обогащения изотопом N^{15} этих фракций к степени обогащения одновременно выделенной фракции небелкового азота (приняв последнюю за 100), мы, по-видимому, получим лишь первое приближение к истинным значениям искомых величин. Но когда степень обогащения изотопом N^{15} предшественников белка и хлорофилла практически станет равной степени обогащения изотопом N^{15} самого белка и хлорофилла, мы с полным основанием можем утверждать, что в этот момент произошло полное обновление азотного состава белка и хлорофилла.

В таблице 3 приведены вычисленные таким путем величины обновления азота белка и хлорофилла в растениях при различной продолжительности их экспозиции в меченом сульфате аммония.

Таблица 3

Степень обновления азота белков и хлорофилла в молодых растениях овса

Время после внесения подкормки с N^{15}, час.	Процент обновленного азота		
	конституционные белки	запасные белки	хлорофилл
6	0	0	0
12	40,6	18,7	21,9
24	53,0	24,8	26,5
36	56,0	18,3	44,0
48	62,6	37,4	57,5
72	91,0	Не определяли	95,0
120	103,0	91,0	Не определяли

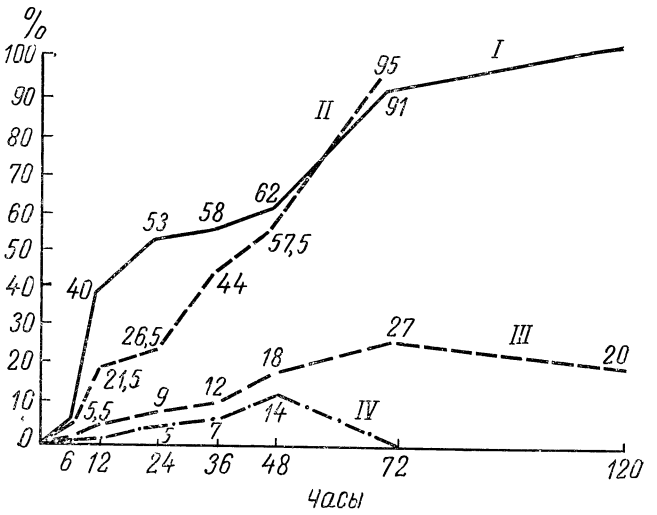


Рис. 1. Изменение в содержании конституционных белков, азота хлорофилла и степень их обновления при различной продолжительности экспозиции растений на меченом азоте (в % от исходных величин).

Приведенные в таблице 3 данные позволяют сделать вывод о чрезвычайно высокой интенсивности процесса обновления азотистого состава белка и хлорофилла. Особенно интенсивно обновляются конституционные белки. Обновление азотистого состава белка и хлорофилла только в сравнительно небольшой степени обусловлено увеличением массы этих веществ за счет внесенного в подкормку азота. Так, например, через 48 часов после внесения подкормки с меченым азотом общее содержание в растениях азота конституционных белков и хлорофилла увеличилось против исходного положения соответственно на 18 и 14%. В этот же срок азотистый состав конституционных белков и хлорофилла обновился на 62,6 и 57,5%.

Еще больше разница между общим увеличением азота белков и хлорофилла в растении и степенью обновления азотистого состава этих веществ для более кратковременных сроков экспозиции растений на меченом азоте (рис. 1). Таким образом, установленное в этих опытах обновление азотистого состава белка и пиррольного ядра хлорофилла в основном обусловлено непрерывно происходящим в организме растений процессом распада и самообновления этих веществ. Этот процесс протекает в молодых растениях чрезвычайно интенсивно. В течение 72 часов произошло почти полное обновление конституционного белка (91%) и азота хлорофилла (95%). Обновление

запасных белков происходит медленно, но и эти белки через 120 часов практически полностью обновляются.

В другой серии опытов мы изучали интенсивность обновления белков и хлорофилла в растениях на более поздней стадии их развития. Такие опыты были проведены с овсом в стадии колошения и с тимофеевкой — перед началом колошения. В качестве азотной подкормки в этих опытах применялся сульфат аммония с 5-кратным обогащением изотопом N^{15} в дозе 0,25 г N на сосуд.

Приведенные в таблице 4 данные показывают, что интенсивность обновления отдельных фракций белка и хлорофилла в значительной степени зависит от стадии развития растений. Если в ранних стадиях развития овса и ржи (1) конституционные белки обновляются значительно быстрее и интенсивнее, чем запасные, то в стадии колошения запасные белки зеленой массы овса обновляются примерно с той же интенсивностью, как и конституционные белки, а в колосьях запасные белки обновляются даже значительно быстрее, чем конституционные. Такое же соотношение в интенсивности обновления конституционных и запасных белков имело место у тимофеевки в стадии, предшествующей колошению.

Повышение интенсивности обновления запасных белков в растениях во время колошения, возможно, находится в связи с процессами интенсивного оттока белковых веществ из вегетативных частей растений в репродуктивные органы, когда происходит усиленное образование запасных белков для формирования колоса. Интенсивность же обновления конституционных белков в стареющих органах растений падает. Особенно резко это проявилось в опыте с тимофеевкой, где конституционные белки даже за 120 часов обновились только на 66,7%, в то время как в молодых растениях овса и ржи конституционные белки полностью обновлялись в течение 72 часов. Интенсивность обновления хлорофилла при старении растений также падает. Если в молодых растениях овса и ржи (1) азот хлорофилла в течение 48 часов обновлялся примерно на 60%, то в стадии колошения овса за тот же период обновилось только 25% азота хлорофилла.

Таким образом, в качестве общего вывода следует признать, что интенсивность обновления белка и хлорофилла в растениях изменяется в зависимости от фаз развития растений. По мере старения растений интенсивность обновления конституционных белков и хлорофилла падает.

В итоге всех проведенных за последние два года исследований с применением меченого азота мы приходим к выводу, что в растениях непрерывно происходят процессы обновления азотистого состава белков и хлорофилла. В молодых растениях в нормальных условиях их питания азот конституционных белков и хлорофилла полностью обновляется в течение 72 часов.

Результаты опытов по изучению азотного обмена с применением изотопа N^{15} тимофеевка перед

Растения	Продолжительность на N^{15} (в час.) и контроль (без подкормки N^{15})	Вес растений, в г	Содержание отдельных фракций азота в растениях в мг N на 100 г сырой массы			
			небелковый органический азот	конституционные белки	запасные белки	хлорофилл
Овес — зеленая масса	48	82,4	116,6	116,5	96,8	10,4
	Контроль	82,5	50,0	85,8	73,5	10,2
Овес — колосья	48	16,8	271,1	332,2	153,0	14,8
	Контроль	14,7	213,6	257,6	144,3	12,6
Тимофеевка —	48	63,0	117,0	494,0	97,0	—
зеленая масса	120	78,0	147,0	405,0	88,0	—

В молодых растениях овса уже при 12-часовой их экспозиции обновлялось около 40% азота конституционных белков и около 20% азота хлорофилла. В опытах с рожью значительное обновление азота белка было констатировано в еще более короткие сроки — между 2 и 4 часами.

Таким образом процессы обновления белка и азотистого компонента хлорофилла характеризуются весьма высокой скоростью. Мы еще не знаем механизма обновления белка и хлорофилла. По-видимому, при обновлении белка происходит только обмен отдельных составных частей молекулы белка, без ее полного распада, путем временного размыкания пептидных связей и включения аминокислоты между концами раскрытых цепей.

Процесс самообновления белка играет фундаментальную роль в органическом мире. Для поддержания прижизненного состояния биологических структур необходима постоянная затрата энергии. Источником энергии в белковых структурных элементах организмов может служить непрерывное окисление входящих в состав белка аминокислот. Взамен окислившихся аминокислот в белковую молекулу включаются новые аминокислоты, чем и обеспечивается сохранение постоянства состава белка. Освобождающиеся в процессе окисления аминокислот безазотистые остатки вовлекаются в общий обмен веществ в растении и, взаимодействуя с поступающим извне или образующимся в самом растении аммиаком (при дезаминировании аминокислот), могут давать новые аминокислоты.

Несмотря на интенсивное самообновление, соотношения отдельных аминокислот в белке являются довольно постоянными. Это в известной мере дает основание предполагать, что процессу обновления белка должно предшествовать образование всего набора аминокислот, составляющих белковую молекулу.

Таблица 4

у растений в более поздние стадии их развития: овес в стадии колошения, колошением

Найденное обогащение отдельных фракций азота изотопом N^{15}				Процент обновленного азота во фракциях		
небелковый органический азот	конституционные белки	запасные белки	хлорофилл	конституционные белки	запасные белки	хлорофилл
2,90	1,91	1,98	1,44	48,0	51,6	25,2
—	—	—	—	—	—	—
Не определяли	1,80	2,23	1,48	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
1,36	1,16	1,23	—	44,5	64,0	—
2,02	1,68	1,74	—	66,7	72,5	—

В этой связи представлялось важным определить скорость образования отдельных аминокислот в растении за счет использования ими внесенного в подкормку азота.

Исследования при помощи хроматографического метода, проведенные в нашей лаборатории в течение 1952 и 1953 гг., показали, что синтез отдельных аминокислот за счет поступившего в растение аммиака осуществляется в определенной последовательности: первым синтезируется аланин, затем дикарбоновые аминокислоты — аспарагиновая и глутаминовая кислоты.

Синтез основных и ароматических аминокислот происходит в более поздние сроки.

В таблице 5 приведены данные опыта, из которых следует, что аммиачный азот, поступая в корни растений, в первую очередь здесь же и перерабатывается на аминокислоты. Уже через полчаса после внесения азотной подкормки в корнях овса накапливается аланин, количество которого по мере удлинения срока экспозиции вначале резко возрастает, а затем падает. Образование глутаминовой кислоты в корнях отмечено в более поздние сроки — через 4 часа, образование аспарагина через 20 часов. Еще позже образуется серин — через 44 часа, а образование триптофана и гистидина в корнях в пределах 44-часового срока не было обнаружено.

Синтез аланина и дикарбоновых аминокислот в растениях, по-видимому, осуществляется непосредственно путем восстановительного аминирования α-кетокислот при взаимодействии их с аммиаком. Тот факт, что первой аминокислотой, синтезируемой в растениях в результате переработки аммиака, является аланин, по-видимому, обусловлен тем, что в растениях в качестве постоянного метаболита в процессе дыхания всегда образуется пировиноградная кислота, которая очень легко при

Таблица 5

Результаты исследования молодых растений овса на содержание в них отдельных аминокислот в различные сроки после внесения подкормки в виде сульфата аммония (в мг N на 100 г сырой массы)

Части растений	Продолжительность экспозиции растений на питательной смеси с азотом (сульфат аммония), час.	Аланин	Аспарагиновая кислота	Глутаминовая кислота	Аспарагин	Серин	Триптофан	Гистидин
Корни	0,5	3,5	0,5	0,5	0	0	0	0
	2	12,2	0,5	0,5	0	0	0	0
	4	44,0	0,5	2,48	0	0	0	0
	20	18,0	3,67	3,96	7,4	0	0	0
	44	8,8	1,23	2,7	1,77	0,77	0	0
Зеленая масса	0,5	Следы	Следы	Следы	0	0	Следы	0
	2	3,7	„	„	0	0	„	0
	4	7,2	„	„	0	0	„	0
	20	17,6	7,85	1,9	0	0	„	0
	44	47,3	4,03	6,33	11,7	10,75	28,2	8,7

взаимодействии с аммиаком дает аланин. Образование аланина при введении в растение аммиака происходит почти мгновенно. В проведенных в нашей лаборатории опытах В. С. Хохряковой с вакуумной инфильтрацией в растения растворов аммиака образование аланина можно было обнаружить уже через 5 минут после инфильтрации аммиака.

По мере израсходования в корнях запасов α-кетокислот, необходимых для синтеза аминокислот, поступающий из почвы аммиак не может уже полностью связываться в корнях и направляется в надземные органы растений. В этом опыте образование аланина в листьях овса за счет переработки внесенного в подкормку аммиачного азота было обнаружено через 2 часа, образование дикарбоновых аминокислот в зеленой массе растений, так же как и в корнях, происходило позже, а синтез триптофана и гистидина — в самые поздние сроки — через 44 часа после внесения в подкормку сульфата аммония.

Имеются основания считать, что ароматические и основные аминокислоты образуются в растениях не путем прямого взаимодействия между аммиаком и соответствующими органическими кислотами, а в результате реакций переаминирования. Именно такое заключение вытекает из проведенных в нашей лаборатории исследований над образованием в растениях отдельных аминокислот при кратковременной их экспозиции на растворах аммиака и последующем выключении аммиака из питательного раствора. В этих опытах образование триптофана и гистидина в растениях было констатировано только через 30—40 часов после того, как весь поглощенный растениями аммиак был переработан в растении на синтез аланина и дикарбоновых

аминокислот. При некотором избытке поступающего в растение аммиака происходит образование аспарагина в результате амидирования аспарагиновой кислоты.

Таким образом, из всего этого следует, что если аланин и дикарбоновые аминокислоты сразу же синтезируются после поступления в растения аммиака, то другие аминокислоты, в частности основные и ароматические аминокислоты, синтезируются только через значительный промежуток времени — через 30—40 часов. Но мы видели, что процесс обновления белков в растениях осуществляется с весьма большой скоростью. Уже через 12 часов после внесения в подкормку меченого азота происходило значительное обновление азотистого состава белков. Но к этому времени такие необходимые для синтеза белков аминокислоты, как триптофан и гистидин, не могли еще образоваться в растениях за счет внесенного в подкормку меченого азота. В этот срок могли образоваться только аланин и дикарбоновые аминокислоты. Отсюда вытекает предположение, что значительная часть из всего набора аминокислот, входящих в состав белка, и прежде всего ароматические и основные аминокислоты, образуются путем реакций переаминирования за счет аминогрупп аланина и дикарбоновых кислот непосредственно, в процессе обновления белковой молекулы.

В процессе обновления белка общее количество его в растении в известных границах может оставаться более или менее постоянным. Если, например, исключить из питательной среды азот, то абсолютное содержание белка в растении, несмотря на непрерывное его самообновление, в течение известного времени будет близким к одной и той же величине. При снабжении растений азотом одновременно с обновлением ранее синтезированных молекул белка будет происходить и синтез новых его молекул, в результате которого общее содержание белка в растении возрастает. Синтез новых молекул белка происходит с меньшей скоростью, чем обновление «старых» молекул. При внесении азотной подкормки в растении через сравнительно короткие промежутки времени может быть констатировано значительное возрастание содержания аминокислот при почти неизменившемся содержании белка. Вместе с тем применение меченого азота позволяет установить, что за этот же срок произошло значительное обновление и азотистого состава белков. Но изменения в общем содержании белка в растении могут быть обнаружены только через более длительные промежутки времени.

Проведенные нами исследования показали, что новый синтез белка сопровождается одновременной убылью сахаров в растении [1].

Последнее дает основания считать, что сахара играют большую роль в процессе синтеза белка в растениях. Можно сделать допущение, что нативный белок в растениях находится в

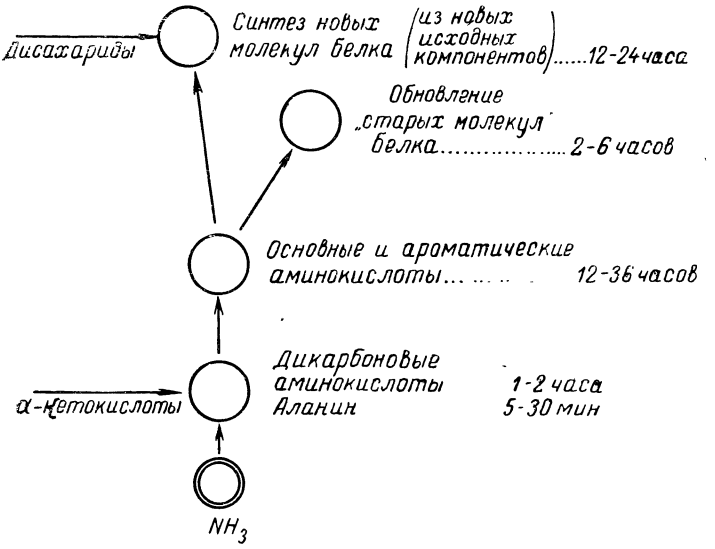


Рис. 2. Схема превращения аммиака в растении.

какой-то связи с сахарами. С другой стороны, можно предположить, что процесс синтеза белка в растениях сопровождается интенсивным окислением сахаров, в результате чего освобождается энергия, необходимая для активации молекул аминокислот, вовлекающихся в реакции синтеза белка.

Результаты проведенных нами исследований азотного обмена растений могут быть представлены в виде схемы (рис. 2).

В этой схеме вертикальными стрелками указаны основные пути превращения в растениях азота, начиная от поступления неорганического азота до синтеза новых молекул белка в растении. Горизонтальными стрелками показано, на каких этапах происходит наиболее интенсивное вовлечение в азотный обмен соответствующих безазотистых органических веществ растений. На правой стороне указано время, в течение которого могут быть обнаружены количественные изменения в соответствующих звеньях азотного обмена, при внесении азотной подкормки, что может служить известным показателем скорости протекания исследуемых процессов.

Эта схема является, конечно, далеко не полной. Она отражает лишь главные направления и скорости отдельных звеньев азотного обмена и только в той мере, насколько это позволяли полученные в наших исследованиях экспериментальные данные.

Выводы

1. Полученные экспериментальные данные по изучению изотопного состава отдельных фракций азота, выделенных из растений при различных сроках их экспозиции на сульфате аммония, обогащенном изотопом N^{15}, показали, что в растениях происходит непрерывное обновление белка и пиррольного ядра хлорофилла. В молодых растениях азотистый состав конституционных белков и хлорофилла полностью обновляется в течение 72 часов.

Интенсивность обновления белка и хлорофилла зависит от фазы развития растений. Наиболее интенсивно этот процесс идет в молодых, быстрорастущих растениях. По мере старения интенсивность обновления белка и хлорофилла падает.

Процесс обновления «старых» молекул белка происходит с большей скоростью, чем процесс синтеза новых молекул белка.

2. Использование методов хроматографии в исследованиях первых продуктов усвоения растениями минерального азота позволило установить, что аминокислоты являются первыми устойчивыми соединениями при превращении аммиака в растениях. В корнях растений уже через 30 минут после внесения азотной подкормки происходит значительное возрастание содержания аминокислот. Синтез отдельных аминокислот за счет поступившего в растения аммиака осуществляется в определенной последовательности: первым синтезируется аланин, затем дикарбоновые аминокислоты. Синтез основных и ароматических аминокислот происходит значительно позже, по-видимому, в результате процессов переаминирования. При избытке аммиачного азота в растениях происходит интенсивный синтез аспарагина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчин Ф. В., Гуминская М. А., Плышевская Е. Г. Изв. АН СССР. Серия биологическая, № 6, 1953.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ И ОБМЕНА У РАСТЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗОТОПА N^{15} *

Изучение процесса переработки минерального азота в растениях на белки всегда было одной из центральных проблем агрономической и биологической химии. Но до недавнего времени многие из наших представлений в этой области основывались скорее на гипотезах, чем на фактах, добытых в результате точного эксперимента. Главная трудность заключалась в том,

* Статья написана в соавторстве с М. А. Гуминской, Е. Г. Плышевской, М. В. Тихомировым, В. В. Зерцаловым и опубликована в журнале «Почвоведение» № 7, 1955.

что нельзя было строго разграничить вновь поступивший в растение азот или вновь синтезированные его соединения (аминокислоты, белки) от таких же, уже имеющихся в растениях соединений азота. Это исключало возможность проведения точного учета всех тех изменений, которые претерпевает минеральный азот на пути от поступления из почвы через корни растений до его локализации в белке листьев или семян.

Применение меченых атомов в биологии, приведшее к столь большим успехам в научной разработке ряда важнейших вопросов, оказывает неоценимую услугу и в исследованиях азотного обмена и азотного питания растений. Применяя в качестве источника азота для растений сульфат аммония, аммиачную селитру и любые другие соединения азота, обогащенные изотопом N^{15}, и определяя затем содержание изотопа N^{15} в выделенных из растения соединениях азота, можно совершенно однозначно ответить на вопрос о том, как быстро поступает азот в тот или иной орган растения, с какой скоростью и в каких органах и тканях растений образуются интересующие нас азотистые органические соединения и какова их дальнейшая судьба в растениях. При этом весьма важным является то обстоятельство, что изотоп азота N^{15} по своему действию на живой организм в любой концентрации ничем не отличается от обычного азота. При использовании наиболее обогащенных изотопом N^{15} аммонийных или азотнокислых солей они будут оказывать на растения в точности такое же действие, как и обычные аммонийные или азотнокислые соли. Никакого токсического или, наоборот, стимулирующего влияния на растения и на животных изотоп N^{15} не оказывает.

В настоящей работе изложены основные результаты наших исследований по азотному питанию и обмену растений, проведенных за последние два года, с применением изотопа N^{15}. Растения для этих исследований выращивались в условиях вегетационного павильона в торфо-песчаных или водных культурах. Питательная смесь, вносившаяся перед посевом растений, включала азот, обычно в дозе 0,3 г N на сосуд, в виде обыкновенного сульфата аммония и все остальные макро- и микроэлементы в нормальных их дозах. Когда растения достигали соответствующего возраста, им давалась азотная подкормка в виде сульфата аммония, обогащенного изотопом N^{15}. Степень обогащения азота изотопом N^{15} во вносимом в подкормку сульфате аммония изменялась для отдельных опытов в широком интервале от 3-кратной до 40-кратной. В связи с тем что к моменту внесения азотной подкормки, меченной по N^{15}, в сосудах оставался в том или ином количестве не использованный растениями обычный азот (вносившийся до посева), фактическое обогащение азота изотопом N^{15} в питательной смеси в сосуде колебалось для отдельных опытов от 2—4-кратного до 25-кратного. Через определенные промежутки

времени после внесения меченой азотной подкормки растения снимались и шли в анализ. Для каждого опыта, как правило, устанавливалось несколько сроков уборки (не менее шести), с тем чтобы иметь более или менее полную кривую превращения азота в растениях во времени. Продолжительность экспозиции растений на меченой азотной подкормке изменялась в отдельных опытах от 15 минут до 240 часов. Одновременно с опытными растениями производилась уборка и контрольных растений, которым не давалась азотная подкормка. Сопоставляя данные анализа контрольных растений с результатами анализа опытных растений, можно было судить о количественных изменениях в содержании в растениях исследуемой фракции азота, вызванных внесением меченой азотной подкормки, что во многих случаях совершенно необходимо для правильной интерпретации данных изотопного анализа.

В убранных растениях определялся неорганический азот (аммиачный N), азот органических небелковых соединений, представленный в опытных растениях в основном аминокислотами, азот хлорофилла, азот коллоиднорастворимых белков и азот нерастворимых тканевых белков. Методика выделения этих соединений азота описана ранее [3]. Коллоиднорастворимые белки ввиду их большей подвижности (в соответствии с принятым подразделением белков зеленых частей растений) мы будем в дальнейшем обозначать как запасные белки, а менее подвижные нерастворимые тканевые белки — как конституционные белки. Эти группы белковых веществ весьма различны по их аминокислотному составу.

Выполненные в нашей лаборатории анализы В. М. Макаревич показали, что запасные белки всех исследованных растений совершенно не содержат пролина и что они значительно богаче триптофаном, аланином, валином и лейцином, чем конституционные белки.

Выделенные из растений фракции азота сжигались по Кьельдалю и после отгона и улавливания аммиака переводились на вакуумной установке в элементарный азот, который затем поступал в изотопный анализ на масс-спектрометре. Измерение на масс-спектрометре дает степень обогащения исследуемой пробы азота изотопом N^{15}. По экспериментально найденной величине обогащения изотопом N^{15} вычислялась степень обновления азота исследуемой фракции согласно формуле:

$$N = \frac{A_1 - 1}{A - 1} \cdot 100,$$

где N — обновленный N в процентах, A — обогащение изотопом N^{15} исходного источника азота; A_1 — обогащение изотопом N^{15} исследуемого соединения азота; за единицу (1) принято содержание изотопа N^{15} в обычном азоте (0,39%).

При вычислении степени обновления аминокислот и амидов (небелкового органического азота) в качестве исходного источника азота принимался вносимый в подкормку меченый сульфат аммония, аммиачный азот которого непосредственно используется на синтез аминокислот и амидов. Но на построение белка и хлорофилла идет не аммиак как таковой, а синтезированные за его счет аминокислоты. Следовательно, при вычислении и степени обновления азота белка и хлорофилла в качестве исходной величины (А) нужно принимать степень обогащения изотопом N^{15} азота аминокислот, являющихся непосредственными предшественниками белка в процессе его образования в растениях. В таблицах 1 и 2 приведены данные, полученные в опыте с овсом в 1953 г.

Таблица 1

Урожай зеленой массы овса и содержание в нем азота отдельных фракций в различные сроки после внесения подкормки с меченым азотом, 1953 г.

Экспозиция растений на N^{15}, час.	Вес зеленой массы растений, г/сосуд	Азот, мг N на сосуд				
		органический небелковый	запасных белков	конституционных белков	хлорофилла	неорганических соединений (NH_3 и др.)
6	49,1	54	81	127	5,8	Нет
12	48,3	64,5	78	131	5,8	„
24	52,6	75,4	82	135	6,2	„
36	52,3	80,1	9	139	6,3	„
48	50,0	76,0	100,5	146	6,7	„
72	49,0	90,0	94	158	5,8	„
120	68,9	95,0	156	148	8,9	„
240	80,3	107,0	150	210	9,6	„
Контрольные варианты без азотной подкормки	49,0	50,0	76	124	5,9	„

Подкормка растений меченым азотом в этом опыте производилась через 24 дня после появления всходов. В качестве подкормки применялся сульфат аммония с трехкратным обогащением изотопом N^{15} в дозе 0,24 г N на сосуд. Так как внесенный в подкормку меченый сульфат аммония разбавлялся в почве обычным сульфатом аммония, внесенным перед посевом и не полностью использованным растениями, то фактическое обогащение сульфата аммония в субстрате было несколько ниже, примерно 2,5. Из таблицы 1, в которой помещены урожайные данные и результаты химического анализа растений, следует, что при экспозиции растений на меченом азоте от 6 до 72 часов вес растений практически оставался на одном и том же уровне и только через 120 часов после внесения азотной подкормки он заметно увеличился.

Таблица 2

Результаты изотопного анализа отдельных фракций азота, выделенных из зеленой массы молодых растений овса, 1953 г.

Экспозиция растений на N^{15} (3-кратное обогащение), час.	Найденное обогащение изотопом N^{15}				% обновленного азота		
	органический небелковый азот (аминокислоты)	азот запасных белков	азот конституционных белков	азот хлорофилла	запасные белки	конституционные белки	хлорофилл
6	1,07	1,00	1,00	1,00	0,0	0,0	0,0
12	1,32	1,06	1,13	1,07	18,7	40,6	21,9
24	1,53	1,13	1,28	1,14	24,8	53,0	26,5
36	1,82	1,15	1,46	1,36	18,3	56,0	44,0
48	1,75	1,28	1,47	1,43	37,4	62,6	57,5
72	1,85	Не определяли	1,77	1,81	—	91,0	95,0
120	1,93	1,85	1,96	Не определяли	91,0	100	—
240	1,95	1,98	2,02	„ „	100	100	—

Содержание в растениях небелкового органического азота (свободных аминокислот) непрерывно возрастает по мере удлинения экспозиции на меченом азоте.

Содержание азота конституционных и запасных белков при экспозициях на меченом азоте от 6 до 72 часов хотя в общем и повышается по мере удлинения экспозиции, но в очень слабой степени. Значительное увеличение содержания в растениях белкового азота наступило только при более длительных экспозициях — при 120 и 240 часов.

Увеличение содержания хлорофилла в растениях также стало достаточно заметным только при более длительных экспозициях (120 и 240 часов).

Однако из данных, помещенных в таблице 2, следует, что внесенный в подкормку меченый азот уже через 12 часов был обнаружен в белковых фракциях и в хлорофилле, а в последующие сроки содержание изотопа N^{15} в белках и в хлорофилле непрерывно возрастает, и через 72—120 часов степень обогащения изотопом N^{15} белков и хлорофилла практически становится равной степени обогащения изотопа N^{15} небелкового органического азота. Таким образом, несмотря на то что общее количество белка и хлорофилла в растении в течение 72 часов после внесения меченой азотной подкормки слабо изменялось, азотный состав этих веществ растений в те же сроки подвергался весьма интенсивному обновлению.

Как следует из приведенных в таблице 2 данных, азот конституционных белков и хлорофилла в течение 72 часов обновлялся на 90—95%, а через 120 часов в растениях этого опыта произошло практически полное обновление азота белка и хлорофилла.

Обновление азотистого состава белка и хлорофилла может быть обусловлено двумя одновременно протекающими в растении процессами — новым синтезом белка и хлорофилла, в результате которого происходит наращивание массы этих веществ, и процессом самообновления белка и пиррольного ядра хлорофилла. В последнем случае происходит полный или частичный распад этих веществ с последующим ресинтезом их за счет аминокислот из обменного фонда растений. Из данных химического анализа растений следует, что в первые 72 часа после внесения меченой азотной подкормки содержание хлорофилла в растениях практически почти не изменялось, поэтому происшедшее в эти сроки обновление азотистого состава пиррольного ядра хлорофилла можно полностью отнести за счет непрерывного процесса его самообновления.

Таблица 3

Азот белка, синтезированного растениями во время их экспозиций на N^{15} (опыт с овсом 1953 г.)

Экспозиция растений на N^{15}, час.	В % ко всему азоту белка (по данным химического анализа)		% обновленного азота белка по данным изотопного анализа	
	конституционные белки	запасные белки	конституционные белки	запасные белки
6	2,4	6,1	0	0
12	5,2	2,6	40,6	18,7
24	8,2	7,2	53,0	24,8
36	10,8	17,0	56,0	18,3
48	16,4	23,4	62,6	37,4
72	22,8	17,0	91,0	Не определяли
120	16,2	51,0	100	91,0
240	50,0	49,3	100	100

В таблице 3 приведена вычисленная по данным химического анализа степень обновления азотистого состава конституционных и запасных белков, обусловленная новым их синтезом, во время экспозиции растения на N^{15}. Из сопоставления этих данных с фактическим обновлением азотистого состава белков, установленным изотопным анализом, следует, что обновление белка, происшедшее в первые часы экспозиции растений на меченом азоте, только в незначительной степени может быть обусловлено новым его синтезом за счет вносимого в подкормку меченого азота. При более длительной экспозиции количество вновь синтезированного белка заметно возрастает и соответственно возрастает его роль в обновлении азотистого состава всей массы белка.

Таким образом, из результатов этого опыта вытекает, что в растениях, помимо нового синтеза белка и хлорофилла, про-

исходит непрерывно процесс самообновления этих веществ. Этот процесс протекает в молодых растениях с исключительно высокой интенсивностью. В данном опыте в течение 48-часовой экспозиции растений на меченом азоте обновилось около 60% азота конституционных белков и хлорофилла, хотя абсолютное содержание белка и хлорофилла в растениях в пределах этого срока изменялось в весьма незначительной степени.

При более длительных экспозициях растений — 120 и 240 часов экспериментально найденное обогащение изотопом N^{15} всех выделенных из растений фракций азота (небелковый органический азот, белковый азот и азот хлорофилла) выражается одинаковой величиной, что является доказательством полного обновления азотистого состава белка и хлорофилла, происшедшего за это время.

Из результатов этого опыта также следует, что скорость обновления двух групп выделенных нами из растений белковых веществ — конституционных и запасных белков — весьма различна. Конституционные белки обновляются со значительно большей интенсивностью, чем запасные. В других опытах, с более короткими экспозициями растений на N^{15}, меченый азот мог быть обнаружен в конституционных белках в более ранние сроки, чем в запасных белках. Это дает известное основание предполагать, что вначале синтезируются конституционные белки, которые, претерпевая соответствующие изменения, превращаются в более подвижные запасные белки.

Таблица 4

Содержание отдельных форм азота в растениях при различной экспозиции на N^{15} (опыт с озимой рожью)

Экспозиция растений на N^{15}, час.	Вес сырой зеленой массы растений, г	В мг N на 100 г сырой зеленой массы растений			
		небелковый азот	запасные белки	конституционные белки	хлорофилл
2	30,0	100,6	138	135	12,2
4	32,5	95,6	149	146	11,1
8	31,3	91,7	143	144	11,7
12	33,0	105,6	142	147	11,9
24	33,9	164,3	142	167	13,0
36	32,1	169,4	160	183	13,8
48	30,5	229,8	159	180	12,2
72	34,1	225,5	192	192	13,9
Контроль без подкормки	32,5	95,2	139	141	12,3

В опыте с озимой рожью, проведенном в августе 1953 г., изучался азотный обмен корней и надземной зеленой массы ра-

стений. Подкормка растений меченым азотом производилась через 25 дней после появления всходов.

Для подкормки применялся сульфат аммония с 5-кратным обогащением изотопом N^{15} в дозе 0,24 г на сосуд. Опыт проводился в условиях водных культур.

В таблицах 4 и 5 приводятся урожайные данные и результаты химического анализа зеленой массы и корней растений.

Таблица 5

Содержание отдельных форм азота в корнях при различной экспозиции растений на N^{15} (опыт с озимой рожью)

Экспозиция растений на N^{15}, час.	Сырой вес корней, г	В мг N на 100 г сырой массы корней		
		небелковый азот	запасные белки	конституционные белки
2	31,2	25,3	18,4	106,5
4	32,3	30,4	22,1	83,0
8	32,3	32,0	29,7	88,7
12	35,0	51,0	37,2	86,7
24	34,5	49,7	31,7	91,7
48	28,6	61,6	37,3	90,0
72	32,6	80,9	33,5	89,7
Контроль без подкормки N^{15}	32,0	22,4	17,4	88,9

Данные химического анализа зеленой массы ржи (табл. 4) примерно однотипны с соответствующими данными, полученными в опыте с овсом в 1953 г. В первые часы экспозиции растений на меченом азоте содержание в зеленой массе обеих белковых фракций практически оставалось на одном и том же уровне, и только при 36-часовой экспозиции произошло достаточно заметное увеличение содержания белкового азота. Закономерных изменений в содержании хлорофилла за все время экспозиции растений на N^{15} не происходило.

Небелковый органический азот в первые восемь часов экспозиции оставался без изменения. В последующие часы экспозиции содержание небелкового азота непрерывно возрастало, и к концу опыта оно увеличилось более чем в 2 раза против исходного состояния растений.

Несколько отличные результаты получены при анализе корней ржи (табл. 5). Здесь содержание конституционных белков практически оставалось без изменений за все 72 часа опыта. Зато количество запасных белков в корнях, начиная с 4-часовой экспозиции, быстро возрастало, и уже через 24 часа после внесения меченой азотной подкормки содержание азота запасных белков удвоилось против исходного состояния.

В таблицах 6 и 7 приводятся результаты изотопного анализа отдельных фракций азота, выделенных из зеленой массы (табл. 6) и корней (табл. 7) растений.

Таблица 6

Результаты изотопного анализа отдельных фракций азота, выделенных из зеленой массы озимой ржи, 1953 г.

Экспозиции растений на N^{15}, час.	Обогащение N^{15}				% обновленного азота			
	небелковый азот	запасные белки	конституционные белки	хлорофилл	небелковый азот	запасные белки	конституционные белки	хлорофилл
2	0	0	0,	0	0	0	0	0
4	1,03	0	1,003	0	0,75	0	0	0
8	1,40	1,022	1,06	0	10,0	5,5	14,9	0
12	1,69	1,031	1,12	Не определяли	17,2	4,5	17,4	Не определяли
24	2,03	1,153	1,30	1,29	25,8	14,8	29,1	28,1
36	3,40	1,565	2,00	1,58	60,0	23,5	41,7	24,2
48	3,14	1,77	1,98	2,06	53,4	35,9	45,7	49,2
72	3,61	2,59	2,44	2,16	65,5	60,8	55,3	44,5

Таблица 7

Результаты изотопного анализа отдельных фракций азота, выделенных из корней озимой ржи, 1953 г.

Экспозиция растений на N^{15} (5-кратное обогащение), час.	Обогащение N^{15}			% обновленного азота		
	небелковый азот	запасные белки	конституционные белки	небелковый азот	запасные белки	конституционные белки
2	1,59	1,13	1,16	14,8	22,0	27,1
4	1,84	1,10	1,14	20,9	11,9	16,7
8	1,90	1,22	1,17	22,5	22,5	18,8
12	2,08	1,24	—	27,1	11,0	—
24	2,50	1,31	1,47	37,5	20,7	31,4
48	3,12	1,59	—	53,0	27,8	—
72	3,73	1,77	1,94	67,5	33,0	40,7

Данные изотопного анализа показывают, что образование небелкового органического азота в корнях растений за счет переработки внесенного в подкормку меченого азота сульфата аммония происходит в достаточно значительных масштабах уже в первые два часа опыта; в течение этого времени небелковый органический азот в корнях ржи обновился на 14,8%. В последующие часы опыта обновление этой фракции азота резко возрастало, что полностью соответствует и данным химического анализа. Необходимо отметить, что в других опытах, проведенных при более кратковременных экспозициях, новое образование аминокислот в корнях растений было обнаружено даже через 15 минут после внесения азотной подкормки. Образование новых аминокислот (небелкового органического азота) в зеленой

массе молодых растений озимой ржи начинается через 4 часа после внесения меченой азотной подкормки. В промежутке времени между 4 и 36 часами интенсивность синтеза аминокислот за счет внесенного в подкормку меченого азота резко возрастала, что обусловлено соответственным усилением поступления азота из корней в надземные органы растений.

Меченый азот в конституционных и запасных белках корней был обнаружен уже при 2-часовой экспозиции растений на N^{15}, что указывает на исключительно высокую скорость вовлечения внесенного источника азота в белковые молекулы корней растений. В конституционных белках зеленых листьев меченый азот был обнаружен через 8 часов после внесения меченой азотной подкормки. Таким образом, в условиях этого опыта весь путь превращений азота в растении, начиная от поступления его из почвы и кончая включением его в состав белковой молекулы листьев растений, был пройден в течение 8 часов. Как видно из данных изотопного анализа, в зеленой массе ржи происходило непрерывное обновление азотистого состава белка и хлорофилла. Масштаб этого процесса в несколько раз превосходил интенсивность новообразования белка и хлорофилла (новообразования, приводящего к увеличению общей массы белка и хлорофилла в растении). Поэтому с достаточным основанием можно считать, что обновление белка и хлорофилла в этом опыте, так же как и в рассмотренном выше опыте с овсом, в основном обусловлено самопроизвольным частичным или полным распадом молекулы белка или пиррольного ядра хлорофилла с одновременно протекающим процессом их воссоздания. В корнях ржи интенсивность обновления белка значительно ниже, чем в зеленой массе, что указывает на существенное различие в белковом обмене корней и зеленых частей растений. Но особенно интересные данные в этом опыте получены для запасных белков корней. Из приведенных в таблице 5 данных химического анализа следует, что содержание азота запасных белков в корнях интенсивно возрастает по мере удлинения экспозиции растений на меченой азотной подкормке. В то же время обновление азота этой фракции белка, вычисленное по данным изотопного анализа, начиная с первых двух часов экспозиции и до конца опыта, характеризуется сравнительно малой величиной.

По данным химического анализа можно вычислить процент долевого участия вновь синтезированного белка в общей массе всего белка. Это будет показателем его обновления, обусловленного только возрастанием общей массы белка.

Сопоставление вычисленных таким путем данных с обновлением азота запасных белков, установленного по данным изотопного анализа, дает следующую картину (табл. 8).

Таким образом, обновление азота запасных белков корней, установленное по данным изотопного анализа, во все часы экспозиции растений было значительно ниже, чем оно должно было

Таблица 8

Изменение в содержании в корнях ржи азота запасных белков и в степени его обновления при различной экспозиции растений на N^{15} по данным химического и изотопного анализа

Экспозиция растений на N^{15}, час.	Увеличение содержания против контрольных вариантов (химический анализ), мг N на 100 г корней	Степень обновления	
		химический анализ	изотопный анализ
2	2,0	5,4	22,0
4	4,7	21,2	11,9
8	11,3	38,2	22,5
12	19,8	52,2	11,0
24	14,3	45,3	20,7
48	19,8	53,4	27,8
72	16,1	48,0	33,0

быть, если судить только по приросту массы белка, не принимая даже в расчет постоянно протекающего процесса самообновления белка. Особенно значителен разрыв между данными изотопного и химического анализа для экспозиций от 4 до 48 часов. Такого несоответствия между количеством запасного белка, образовавшегося при экспозиции растений на меченом азоте, и степенью обогащения этого белка изотопом N^{15} не могло быть, если бы вновь образовавшийся запасной белок был построен за счет внесенного в подкормку меченого азота. Сравнительно низкая степень обогащения изотопом N^{15} запасного белка корней наряду с резким увеличением его общего содержания, происшедшим после внесения меченой азотной подкормки, может быть объяснена только в том случае, если допустить экзогенное «некорневое» образование большей части запасного белка, оказавшегося в корнях после внесения меченой азотной подкормки. Таким образом, мы можем сделать только один вывод, что содержание запасных белков в корнях при внесении азотной подкормки, увеличивалось в результате притока мобильных запасных белков из надземных органов растений, в данном случае из зеленой массы ржи. Так как внесенный в подкормку меченый азот включался в состав запасных белков зеленой массы ржи позже, то понятно, что приток запасных белков из зеленой массы в корни вызвал соответственное понижение степени обогащения изотопом N^{15} общей массы запасных белков в корнях. Можно сделать предположение, что переработка в корнях растений неорганического азота в аминокислоты осуществляется при участии запасных белков, которые могут являться носителями соответствующих ферментных систем, катализирующих реакции синтеза аминокислот в растениях. При повышенном притоке неорганического азота содержание этих белков в корнях оказывается недостаточным и растения реагируют на это оттоком соответствующих количеств мобильных запасных белков из

листьев в корни. В пользу такого предположения отчасти говорят и данные, полученные в одном из наших опытов по изучению синтеза аминокислот в корнях при внесении азотной подкормки в виде аммиачного азота.

В первые часы после внесения азотной подкормки содержание непереработанного аммиака в корнях возрастало, но затем, после 12-часовой экспозиции растений на питательной смеси с аммиачным азотом, оно постепенно падало при одновременном возрастании интенсивности синтеза аминокислот, а через 72 часа после внесения азотной подкормки в корнях овса можно было обнаружить только следы аммиака (табл. 9).

Таблица 9

Содержание аммиачного азота и азота некоторых аминокислот в корнях, мг N на 100 г сырого веса корней. Водные культуры

Экспозиция растений на N^{15}, час.	NH_3	Аланин	Дикарбоновые аминокислоты	Аспарагин
1	15,3	5,5	4,1	Нет
6	37,0	8,4	6,1	„
12	46,0	12,4	8,3	„
24	40,0	14,1	14,0	„
48	27,8	21,2	12,1	18,15
72	Следы	26,1	11,1	45,5

Очевидно, в первые часы после подкормки корни растений не были адаптированы для переработки больших количеств аммиака, но в дальнейшем, в результате регулирующих функций живого организма, поступивший в корни аммиак полностью перерабатывался в аминокислоты и амиды. Возможно, что в этом приспособлении растений к переработке аммиака играет значительную роль перемещение некоторого количества запасных белков из листьев в корни растений.

В опыте, проведенном в 1954 г. с овсом, изучалась сравнительная скорость синтеза и обновления азота аминокислот (органического небелкового азота), конституционных и запасных белков и хлорофилла. Для этого опыт одновременно проводился в двух сериях: 1) в условиях обычного нормального освещения и 2) в условиях сильного затемнения. Затемнение опытных растений во второй серии производилось путем сплошного ограждения вагонеток с установленными на них сосудами черной хлопчатобумажной тканью. Опыт проводился в водных культурах. В качестве меченого источника азота для подкормки растений применялся сульфат аммония с 40-кратным обогащением изотопом N^{15}. Столь высокое обогащение исходного источника азота позволяло весьма точно определить содержание меченого азота в выделенных из растений фракциях, даже в тех случаях, когда меченый азот включается в состав исследуемой фракции

в весьма незначительных количествах, что, как правило, имеет место при кратковременных экспозициях растений на меченом азоте. Как и в других рассмотренных в этой статье опытах, подкормка растений меченым азотом производилась в ранние стадии развития растений, когда они достигали 25-дневного возраста. Проведение этих опытов представляло интерес с точки зрения установления непосредственной связи между процессами фотосинтеза и образования белка и аминокислот в зеленых органах растений, на что имеются указания в ряде работ, проводившихся в последние годы как у нас, так и за рубежом [1, 2, 5, 6, 7].

В таблице 10 приведены урожайные данные и данные химического анализа растений для обеих серий опыта.

Таблица 10

Содержание в растениях (овес) отдельных форм азота при различной экспозиции на N^{15}, мг N на 100 г сырого веса растений, 1954 г.

Экспозиция растений на N^{15}, час.	Сырой вес растений, г	Небелковый органический азот (аминокислоты)	Запасные белки	Конституционные белки	Хлорофилл
А. Опыт в условиях нормального освещения					
6	28,5	53,2	—	—	11,4
12	30,4	80,0	83,0	91,2	10,2
24	28,4	99,7	115,4	108,0	12,9
48	27,0	151,5	103,5	99,6	12,0
72	28,6	194,2	104,6	125,1	10,4
Контроль без подкормки N^{15}	29,6	53,2	81,8	91,2	11,0
Б. Опыт в условиях затемнения					
6	29,6	58,2	—	90,8	9,2
12	30,4	80,0	90,9	—	10,2
24	28,4	72,9	75,6	82,2	8,6
48	27,0	125,0	—	84,9	9,2
72	29,9	172,8	76,0	88,6	8,6
Контроль без подкормки N^{15}	31,9	52,8	67,7	81,2	8,7

В содержании в растениях белкового азота и азота хлорофилла нет сколько-нибудь закономерных изменений, определяемых длительностью экспозиции растений на меченом азоте. Имеются лишь сравнительно незначительные отклонения в ту или другую сторону от исходного состояния растений. Только для азота конституционных белков при 72-часовой экспозиции растений на меченом азоте обнаружено заметное увеличение. Но

содержание небелкового органического азота (аминокислоты) по мере удлинения экспозиции непрерывно возрастает. Без сомнения, новый синтез белка и хлорофилла в растениях происходил в течение всего опытного периода, но прирост этих веществ за сравнительно короткое время опыта был недостаточен для того, чтобы его можно было учесть химическим анализом. Но между сериями опыта с нормальным освещением и затемнением имеются вполне доказуемые различия. При затемнении растений содержание в них всех фракций азота было несколько ниже, чем в растениях с нормальным освещением. Это дает известные основания считать, что синтез всех азотистых органических соединений растений в темноте происходит медленнее, чем на свету.

Результаты изотопного анализа фракций азота, выделенных из растений этого опыта, приведены в таблице 11.

Таблица 11

Результаты изотопного анализа отдельных фракций азота, выделенных из зеленой массы молодых растений овса, 1954 г.

Экспозиция растений (40-кратное обогащение N^{15}), час.	Обогащение изотопом N^{15}				% обновленного азота		
	органический небелковый азот	конститутионные белки	запасные белки	хлорофилл	конститутионные белки	запасные белки	хлорофилл
А. Опыт в условиях нормального освещения							
6	4,01	1,37	1,21	1,59	12,2	7,0	19,6
12	4,06	1,67	1,48	1,79	21,9	15,6	26,2
24	8,18	2,49	2,30	3,09	20,8	18,2	29,1
48	16,40	8,72	4,50	7,10	50,2	22,7	39,7
72	19,61	—	7,89	—	—	37,0	—
Б. Опыт в условиях затемнения							
6	1,58	1,07	1,04	Не определяли	12,0	7,0	Не определяли
12	2,40	1,35	1,14	То же	25,0	10,0	То же
24	6,54	2,15	1,75	3,33	20,7	13,7	42,0
48	10,6	3,50	2,28	Не определяли	26,0	13,3	Не определяли
72	15,32	4,92	4,45	4,97	27,3	24,1	27,4

Приведенные в таблице 11 данные изотопного анализа отдельных фракций азота, выделенных из растений с нормальным освещением, хорошо согласуются с результатами уже рассмотренных опытов. Новым является только высокое обогащение изотопом N^{15} всех фракций азота, что значительно повышает

точность опыта и достоверность вытекающих из него выводов *.

При затемнении растений степень обогащения изотопом N^{15} всех выделенных из растений фракций при всех сроках экспозиции растений на меченой азотной подкормке была значительно ниже, чем для соответствующих фракций азота в опыте с нормальным освещением. Это прежде всего говорит о том, что интенсивность поступления азота в растение зависит от условий освещения: при недостатке света поступление азота в растение падает и интенсивность образования аминокислот в растениях понижается. Но и поступивший в растение и использовавшийся в нем на синтез аминокислот меченый азот включается в химический состав белков при затемнении растений медленнее, чем на свету. В итоге интенсивность синтеза и обновления белка в растениях при затемнении значительно понижается. Таким образом, свет является важным фактором в азотном питании и обмене растений. Очевидно, синтез аминокислот, и в особенности белка в зеленых растениях, непосредственно сопряжен с фотосинтетическим процессом, но установление причинных связей между этими процессами требует дальнейших исследований. Что касается влияния условий освещения на обновление хлорофилла, то, судя по измерениям степени обогащения азота хлорофилла изотопом N^{15} для двух сроков экспозиции растений на меченой азотной подкормке, можно лишь утверждать, что обновление азота хлорофилла происходит и в темноте, но в какой степени изменяется интенсивность этого процесса в сравнении с растениями на свету, по полученным в этом опыте единичным данным судить нельзя.

Выводы

1. В растениях происходит непрерывное самообновление белка. Этот процесс протекает с весьма высокой интенсивностью в надземных органах (листьях) молодых растений, в которых в течение 72—120 часов практически полностью обновляется весь азот конституционных белков.

2. Запасные, коллоидно-растворимые белки зеленых частей растений обновляются значительно медленнее, чем конституционные белки. Меченый азот обнаруживается в составе конституционных белков в более ранние сроки, чем в составе запасных белков, что дает основание считать, что первоначальный синтез белка начинается с образования конституционных белков.

3. В корнях растений обновление как конституционных белков, так и запасных происходит со значительно меньшей интенсивностью, чем в листьях.

4. Полученные данные показывают, что поступивший в растение минеральный азот очень быстро используется на синтез

* Высокое обогащение изотопом N^{15}, выделенных из растений фракций азота, обусловлено соответственно более высоким обогащением изотопом N^{15} применявшегося для подкормки сульфата аммония.

аминокислот в корнях растений. Во всяком случае, в проведенных опытах уже через 2 часа после внесения меченой азотной подкормки можно было обнаружить значительное количество вновь образовавшихся меченых аминокислот. Внесенный в подкормку меченый азот был обнаружен в листьях растений через 4 часа в составе аминокислот и через 6 часов в химическом составе белка и хлорофилла.

5. При внесении меченой азотной подкормки содержание в корнях мобильных, запасных белков резко повышалось за счет их оттока из листьев растений. Высказано предположение, что переработка в корнях неорганического азота осуществляется при участии запасных белков, как носителей соответствующих ферментных систем, катализирующих синтез аминокислот в растении. При повышенном притоке неорганического азота содержание этих белков в корнях становится недостаточным и растения восполняют этот недостаток оттоком запасных белков из листьев в корни.

6. Условия освещения растений играют важную роль в азотном питании и обмене растений. Даже при кратковременной экспозиции растений в темноте (6 часов) поступление азота в растение резко падает при одновременном резком понижении интенсивности синтеза аминокислот. Интенсивность процессов синтеза и обновления белка в темноте также падает.

7. Азот пиррольного ядра хлорофилла постепенно обновляется. Интенсивность обновления азотистого состава хлорофилла весьма высока: в проведенных опытах азот хлорофилла обновлялся примерно наполовину в течение 36—48 часов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева Т. Ф. ДАН СССР, т. 78, вып. 5, 1951.
2. Ничипорович А. А. Основные проблемы фотосинтеза. Проблемы ботаники, 1950.
3. Турчин Ф. В., Гуминская М. А., Плышевская Е. Г. Изв. АН СССР, сер. биологическая, № 6, 1953.
4. Турчин Ф. В., Гуминская М. А., Плышевская Е. Г. Физиология растений, т. 2, вып. 1, 1955.
5. Calvin M., Massini P. Experimentia. v. 8, N 12, 1952.
6. Gibbs M. Arch. Biochem. a. Biophys. v. 53, N 1, 1953.
7. Gibbs M. Plant Physiology. v. 26, 1951.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О МЕХАНИЗМЕ ФИКСАЦИИ АТМОСФЕРНОГО АЗОТА В КЛУБЕНЬКАХ БОБОВЫХ РАСТЕНИЙ *

Механизм фиксации атмосферного азота в клубеньках бобовых растений до последнего времени оставался неясным.

* В выполнении исследований, кроме автора этой работы, принимали участие З. Н. Берсенева, Е. Г. Плышевская, В. В. Зерцалов и Г. Г. Жидких. Статья опубликована в журнале «Почвоведение» № 10, 1959.

Бесспорным является то положение, что клубеньковые бактерии Rhizobium не могут фиксировать молекулярный азот, развиваясь вне высшего растения и что этот процесс осуществим только в симбиозе бактерий с высшим растением. Именно такой вывод вытекает из огромного экспериментального материала, представленного в работе Аллисона [2]. Применение изотопного метода с использованием тяжелого изотопа N^{15} при изучении симбиотической фиксации азота, начатое около 15 лет назад в работах Бэрриса, Ипплинга, Уолина и Вильсона [5], позволило установить, что фиксация молекулярного азота происходит и в изолированных от растений клубеньках. Однако интенсивность фиксации азота в изолированных клубеньках бобовых в большинстве случаев была невысокой. В опытах Мэчэта, Бэрриса и Вильсона [6] только в трех процентах всех проб была достоверно констатирована фиксация.

В опытах Зилитча, Вильсона и Бэрриса [8] и Эйприсона, Мэги и Бэрриса [3] при помещении клубеньков сои в атмосферу меченого азота сразу же после отделения их от растения фиксация азота происходила во всех случаях, хотя интенсивность ее была не высокой. Следовательно, изоляция клубеньков от всего растения, даже в пределах очень коротких промежутков времени, резко ограничивает интенсивность фиксации азота. Это очень хорошо видно из данных, приведенных в работе Бонда [4]. Этот исследователь помещал целые молодые растения ольхи Alnus glutinosa и изолированные ее клубеньки в атмосферу, обогащенную изотопом N^{15}, и нашел, что содержание меченого азота в изолированных клубеньках было в несколько раз ниже, чем в не изолированных от растений клубеньках.

Таким образом, изучение фиксации молекулярного азота при функционировании всей симбиотической системы в целом и при одновременном использовании метода изолированных клубеньков может представить более широкие возможности для дальнейшего прогресса в познании механизма этого процесса, чем использование для этих целей только изолированных клубеньков.

Главной целью исследований, основные результаты которых изложены в настоящей работе, являлось выяснение следующих вопросов.

1. Точная локализация процесса фиксации атмосферного азота. Развитие изотопного метода за последние годы позволило установить, что этот процесс осуществляется в клубеньках. Но клубеньки бобовых представляют сложную систему, включающую гипертрофированную ткань высшего растения и бактериальные тела. Хотя и принято считать, что фиксацию молекулярного азота в клубеньках осуществляют бактерии Rhizobium, но точных данных, подтверждающих это положение, не было получено. 2. Химическая природа первичных продуктов симбиотиче-

ской фиксации азота. 3. Интенсивность фиксации и скорость оттока фиксируемого азота из клубеньков в другие органы растений. 4. Фиксация азота в клубеньках бобовых растений и углеводный баланс.

Исследования большей частью проводили с растущими растениями и в меньшей мере с изолированными от растений клубеньками. В качестве подопытных растений использовали люцерну, горох, красный клевер и желтый люпин, которые выращивали в условиях вегетационных опытов в сосудах размером 20 × 20 или 17 × 30 см.

Перед посевом семена инокулировали чистой культурой высокоактивного штамма клубеньковых бактерий, вызвавших впоследствии интенсивное образование клубеньков на корнях растений.

В почву (известкованная подзолистая суглинистая Долгопрудной агрохимической опытной станции) при закладке опытов вносили в оптимальных дозах фосфорные и калийные удобрения, а также микроэлементы — бор и молибден.

В период наиболее интенсивной фиксации атмосферного азота (о чем можно было судить по резкому усилению прироста массы растений и по интенсивности их зеленой окраски) сосуд с растениями помещали в специально оборудованную, герметически закрывающуюся стеклянную камеру емкостью в 33,1 л, снабженную необходимыми приспособлениями для впуска и выхода воздуха. Из камеры после проверки ее герметичности откачивали от 8 до 10 л воздуха, затем ее выходное отверстие закрывали и в камеру из газометра вводили последовательно 1,5 л CO_2* и 6,5—8,5 л газообразного азота, обогащенного изотопом N^{15}. Степень обогащения азота атмосферы изотопом N_2^{15} в камере, в условиях проведения отдельных опытов, варьировала от 0,72 до 1,52 атом% избытка атомов N^{15} (2,9—5,0-кратное обогащение против естественного содержания N^{15} в обычном азоте).

Продолжительность экспозиции растений в камере с N_2^{15} варьировала по условиям опыта от 12 до 90 часов. По истечении заданного срока экспозиции растения немедленно снимали и подвергали исследованию. Листья, стебли и корни растений после взвешивания растирали в стеклянной ступке и затем экстрагировали водой. Водные экстракты подвергали нагреванию на кипящей водяной бане. В этих условиях происходила полная коагуляция белков, которые затем отфильтровывали и исследовали отдельно от фильтрата, содержащего только небелковые соединения азота. Выделенные из растений фракции анализировали на содержание азота по Кьельдалю и его изотопный состав на масс-спектрометре МС-2.

---

* Углекислоту вводили в камеру с целью предотвращения возможного недостатка CO_2 для углеродного питания растений.

Метод исследования клубеньков должен был обеспечить полное отделение бактерий Rhizobium от клеточного сока и форменных элементов клубеньковой ткани. Было найдено, что при легком раздавливании оплавленной стеклянной палочкой клубеньков в фарфоровой чашке с водой бактерии практически полностью можно отделить от форменных элементов клубеньковой ткани путем фильтрования раздавленных под водой клубеньков через слабый бумажный фильтр. Клубеньковая ткань остается на фильтре, а бактерии вместе с разбавленным в воде клеточным соком клубеньков проходят в фильтрат. Последний повторно фильтруют через бактериальный фильтрат — свечу Чемберлена — с применением разрежения для ускорения фильтрования. Бактерии полностью остаются на фильтре, а раствор клеточного сока переходит в фильтрат. Отфильтрованную бактериальную массу промывают на этом же фильтре дистиллированной водой и затем снимают с фильтра при помощи стеклянной палочки с насаженным на ее конец кусочком каучука. Микроскопическое исследование выделяемой таким путем бактериальной массы показало, что она свободна от каких-либо посторонних включений.

В последнее время для отделения бактерий от клеточного сока в нашей лаборатории применяют супер-центрифугу с 20 000 оборотов в минуту при ускорении в 12 000 g. При двукратном центрифугировании в течение 15—20 минут взвеси бактерий в разбавленном водой клеточном соке бактерии практически полностью осаждаются на стенках ротора центрифуги. Результаты анализа клубеньковых бактерий люцерны, клеточного сока клубеньков и клубеньковой ткани, отмытой от бактерий и клеточного сока, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав клубеньковых бактерий люцерны (Rhizobium mililoti) **клеточного сока клубеньков и клубеньковой ткани (мезга), % на сухой вес**

Компоненты клубенька	Общее содержание исследуемой фракции в клубеньках	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Mo	Fe	Полисахариды
Бактерии	18,0	9,54	1,34	0,37	0,57	0,02	0,0034	0,080	9,8
Клеточный сок (сухой остаток)	19,2	9,15	1,09	2,6	1,12	0,55	0,0390	0,020	—
Отмытая клубеньковая ткань	62,8	4,75	0,45	0,15	0,78	0,03	0,0030	0,040	—

Судя по содержанию азота, около 55% всей массы бактерий приходится на белковые вещества. Характерным для бактерий является сравнительно высокое содержание железа. Интересно, что молибден, которому придается важная роль в фиксации

азота клубеньками, в основной массе локализован в клеточном соке клубеньковой ткани, в бактериях же его содержится примерно в 10 раз меньше, чем в клеточном соке.

Выделенные из клубеньков бактерии, равно как и другие компоненты клубенька, подвергли анализу на содержание общего азота и его изотопный состав (табл. 2).

Таблица 2

Меченый азот в клубеньковых бактериях (Rhizobium), в клеточном соке клубеньков и в белке клубеньковой ткани бобовых растений

№ опыта	Растение	Экспозиция в атмосфере N^{15}, час.	Бактерии Rhizobium		Клеточный сок клубеньковой ткани		Клубеньковая ткань	
			атом% избытка N^{15}*	меченый азот, % к общему	атом% избытка N^{15}	меченый азот, % к общему	атом% избытка N^{15}	меченый азот, % к общему
1	Люцерна	12	0,00	0,0	0,18	22,4	0,00	0,0
2	„	24	0,02	1,7	0,44	38,5	0,06	5,4
3	„	48	0,08	7,0	0,43	37,8	0,09	7,8
4	„	90	0,07	6,1	0,41	35,8	0,11	9,7
5	Клевер	24	0,03	2,6	0,34	30,0	0,04	3,5
6	Горох	12	0,00	0,0	0,40	35,5	0,00	0,0
7	„	24	0,01	0,9	0,61	53,7	0,01	0,9
8	„	48	0,06	5,3	0,44	38,2	0,05	4,4
9	Люпин	48	0,07	9,7	0,26	36,2	0,07	9,7

* Обогащение азота атмосферы изотопом N^{15} в опыте 1 было 0,81 атом% избытка N^{15}; в опыте 9 — 0,72 атом% избытка N^{15}; во всех остальных опытах оно было равным 1,14 атом% избытка N^{15}.

При наиболее короткой в этих опытах экспозиции гороха и люцерны в атмосфере $N_2{}^{15}$ (12 часов) меченый азот был обнаружен в весьма значительных количествах в составе водорастворимой фракции клубеньков и совершенно отсутствовал в бактериях. Крайне низкое обогащение изотопом N^{15}, стоящее на грани точности опыта, было обнаружено для азота бактерий и при экспозиции люцерны в атмосфере меченого азота в течение 24 часов. При более длительных экспозициях содержание меченого азота в бактериях несколько повышается, но его нельзя сравнить с весьма высокой величиной для водорастворимой азотистой фракции клеточного сока клубеньков. Содержание меченого азота в белках отмытой клубеньковой ткани незначительно, но в среднем несколько выше, чем в бактериях.

Результаты этих опытов дают неоспоримые доказательства того положения, что фиксация атмосферного азота в клубеньках бобовых осуществляется не в бактериях, а в клетках клубеньковой ткани, представляющей перерожденную ткань высшего

растения. Вероятно, бактерии выделяют какое-то вещество, под воздействием которого образуется на корнях бобовых специфическая клубеньковая ткань, обладающая соответствующей ферментной системой, при участии которой и осуществляется фиксация молекулярного азота атмосферы. Сами же по себе бактерии не могут фиксировать молекулярный азот. До сих пор никому не удавалось наблюдать фиксацию азота в чистых культурах. И если у некоторых исследователей как будто бы и происходила фиксация азота изолированными от растений бактериями, то в этом повинны только случайные загрязнения или недостаточная точность аналитических методов. В первые часы экспозиции бобовых растений в атмосфере, обогащенной N^{15}, меченый азот может быть обнаружен только в составе водорастворимых небелковых азотистых соединений клеточного сока клубеньков.

Для установления химической природы первых продуктов симбиотической фиксации азота необходимо было определить, в составе каких именно соединений впервые появляется меченый азот. По данным количественного хроматографического анализа, около 50% всего водорастворимого азота клеточного сока люцерны представлено аспарагином [1]. Согласно данным, полученным в нашей лаборатории З. Н. Берсеневой и В. М. Макаревич, в весьма больших количествах (от 25 до 60%) аспарагин содержится и в клубеньках клевера, гороха, люпина. По данным Сен и Бурма [7], в больших количествах аспарагин представлен также в составе клеточного сока клубеньков бобовых, возделываемых в условиях Индии: чечевица — Lenz esculenta; чина — Lathiyrus sativus, нут — Cicer arietinum; горох — Pisum sativum. Кроме аспарагина, в состав клеточного сока входят различные аминокислоты.

Для выделения аспарагина и отдельных аминокислот был использован метод многослойной восходящей или круговой хроматограммы. Идентификацию отдельных аминокислот производили нингидринной реакцией на нескольких листах многослойной хроматограммы. По этим проявленным листам устанавливали локализацию аминокислот на необработанных нингидрином листах хроматограммы. Участки бумаги с локализованными на них аминокислотами вырезали, аминокислоты из этих участков выщелачивали дистиллированной водой и подвергали повторной хроматографической очистке. В процессе очистки отдельных аминокислот происходили значительные их потери, поэтому абсолютный выход большинства индивидуальных аминокислот был мал, кроме аспарагина, содержащегося в исходном материале в весьма больших количествах. Чтобы иметь достаточные количества исследуемого материала, обеспечивающие высокую точность эксперимента, оказалось необходимым выделять отдельно только аспарагин, а все индивидуальные аминокислоты объединить в две группы — дикарбоновые амино-

кислоты (сумма глутаминовой и аспарагиновой кислот) и сумму всех прочих аминокислот.

Результаты изотопного анализа этих трех фракций клеточного сока клубеньков бобовых растений при экспозиции их в атмосфере меченого азота в течение 24 часов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Распределение меченого азота между аспарагином и другими аминокислотами, выделенными из клеточного сока клубеньков бобовых растений

Растение	Атом % избытка N^{15}			Меченый азот, % к общему азоту		
	аспарагин	дикарбоновые аминокислоты (аспарагиновая + глутаминовая)	прочие аминокислоты	аспарагин	дикарбоновые аминокислоты (аспарагиновая + глутаминовая)	прочие аминокислоты
Люцерна	0,65	0,24	0,27	57,5	21,0	23,8
Клевер	0,47	0,16	0,09	41,3	14,0	7,9
Горох	0,71	0,20	0,26	62,0	17,6	23,0

Наиболее высокое обогащение изотопом N^{15} в этих опытах было обнаружено для аспарагина. В дикарбоновых аминокислотах и в смеси прочих аминокислот содержание меченого азота было в несколько раз меньше, чем в аспарагине.

Результаты этих опытов не совпадают с данными, полученными в опыте Эфприсона, Мэги и Бэрриса [3], в котором при изучении фиксации азота на изолированных клубеньках наиболее высокое обогащение изотопом N^{15} отмечено для глутаминовой кислоты и значительно меньше оно было для аспарагина. Возможно, что такой результат в опыте Эфприсона и сотр. и является артефактом, так как в его опытах клубеньки предварительно были растерты в 3 н. HCl, в результате чего должно было происходить омыление аспарагина.

В ряде наших других опытов с люцерной, клевером и горохом были получены совершенно однотипные данные, показывающие, что фиксируемый в клубеньках бобовых азот используется в первую очередь на синтез именно аспарагина, а не дикарбоновых или каких-либо других аминокислот. При этом в составе самого аспарагина меченый азот в максимальном количестве обнаруживается в амидной группе. Это видно из данных таблицы 4.

Таким образом, содержание меченого азота в легкоомыляемой амидной фракции клеточного сока в этих опытах было в 3—7 раз больше, чем во всех других азотистых фракциях клеточного сока клубеньков люцерны. Так как аспарагин образуется в растениях в результате взаимодействия аммиака с аспарагиновой кислотой, а амидный азот аспарагина представляет

Таблица 4

Содержание меченого азота в легкоомыляемой амидной и неомыляемой аминной фракциях клеточного сока клубеньков бобовых растений

Растение	Экспозиция в атмосфере N^{15}, час.	Атом% избытка N^{15} в атмосфере	Легкоомыляемая амидная фракция азота			Неомыляемая аминная фракция (азот остатка после отгона амидного N в виде NH_3)		
			общее содержание азота, мг/сосуд	атом% избытка N^{15}	меченый азот, % к общему азоту фракции	общее содержание азота, мг/сосуд	атом% избытка N^{15}	меченый азот, % к общему азоту фракции
Люцерна	24	0,88	7,52	0,43	49,4	11,0	0,07	7,9
»	24	1,17	6,79	0,44	37,7	10,19	0,13	11,1
»	40	0,80	2,24	0,31	38,7	3,92	0,10	12,5
»	90	0,78	7,20	0,41	52,5	12,4	0,15	19,2
Люпин	48	0,72	6,6	0,46	65,2	24,2	0,20	27,7

не что иное, как трансформированный аммиак, то только аммиак и является одним из первичных, если не самым первым продуктом биологической фиксации азота атмосферы в клубеньках бобовых.

Таблица 5

Изменения в содержании меченого азота в отдельных фракциях клеточного сока клубеньков бобовых растений при смене атмосферы N_2^{15} на обычную атмосферу

Растение	Условия опыта	Содержание меченого азота, % к общему азоту фракции		
		общий водорастворимый азот	легкоомыляемый амидный азот	аминный азот
Люцерна	48 час. в атмосфере N_2^{15}	35,0	49,1	19,5
»	48 час. в атмосфере N_2^{15} и затем 24 часа в обычной атмосфере	12,2	13,7	10,5
»	48 час. в атмосфере N_2^{15} и затем 48 час. в обычной атмосфере	2,4	2,1	2,4
Клевер	48 час. в атмосфере N_2^{15}	44,5	62,0	23,0
»	48 час. в атмосфере N_2^{15} и затем 24 часа в обычной атмосфере	14,6	12,4	15,6
»	48 час. в атмосфере N_2^{15} и затем 48 час. в обычной атмосфере	3,8	3,2	3,0

Фиксированный в клубеньках азот непрерывно отводится в другие органы растения. Скорость этого перемещения весьма значительна. В таблице 5 приведены результаты опытов, в которых определяли содержание меченого азота в отдельных фракциях клеточного сока клубеньков люцерны и клевера при экспо-

зиции этих растений сначала в атмосфере N^{15} и затем через 24 и через 48 часов после смены меченой по N^{15} атмосферы на обычную нормальную атмосферу.

Уже через 24 часа после замены меченой атмосферы на нормальную содержание меченого азота в клеточном соке клубеньков резко упало. Это падение в первую очередь происходило за счет амидной фракции, в которой содержание меченого азота упало в 4—5 раз, в то время как в аминной фракции оно снизилось всего лишь в 1,5—2 раза. Это вполне понятно, так как в данном случае фиксированный обычный азот прежде всего включается в состав амидной группы, и, следовательно, ранее фиксированный в этой группе меченый азот при последующей смене атмосферы быстрее замещался на обычный азот.

Более полное представление об интенсивности процесса фиксации молекулярного азота в клубеньках и о скорости включения вновь фиксируемого азота в состав азотистых веществ отдельных органов бобовых растений могут дать результаты опыта с горохом, приведенные в таблице 6.

При относительно кратковременной экспозиции (24 часа) меченый азот в наибольшем количестве обнаружен в водорастворимой фракции клубеньков, т. е. в их клеточном соке; это подтверждает факт, что фиксация азота локализуется именно в этой фракции клубеньков. Фиксированный здесь азот, как это можно судить по степени обогащения изотопом N^{15} отдельных азотистых фракций растений, отводится через непосредственно прилегающие к клубенькам корни сначала в стебли, а затем в листья растений.

Вновь фиксированный в клубеньках азот в первые 24 часа остается в растении в основной своей массе в форме небелковых соединений (амиды и аминокислоты). Но уже через 72 часа фиксированный меченый азот был обнаружен в белках, в наибольшем количестве в стеблях и в меньшем — в корнях и листьях. Всего же при общей массе растений около 180 г в течение трех суток было фиксировано 122 мг азота, а в сутки в среднем фиксируется около 40 мг азота. Примерно такие же результаты были получены в опытах с люцерной, люпином и клевером.

Так как фиксация атмосферного азота осуществляется в клубеньковой ткани высшего растения, то всякое изменение ее интенсивности обусловливается прежде всего состоянием высшего растения. Очевидно, активность клубеньковой ткани как азотфиксирующей системы зависит от притока к ней каких-то веществ, продуцируемых в других органах высшего растения. При неблагоприятных для роста растений условиях среды или при старении растений в них продуцируется меньше этих веществ и соответственно падает каталитическая активность клубеньковой ткани.

Такое заключение вытекает также из опытов по изучению влияния условий освещения на симбиотическую фиксацию азота

Таблица 6

Содержание общего и меченого азота в небелковых и белковых фракциях отдельных органов гороха

Органы растений	Сырой вес, г/сосуд	Водорастворимый небелковый азот (аспарагин и аминокислоты)		Белковый азот		Азот всех фракций, мг N на сосуд	Меченый азот, мг N на сосуд
		общий азот, мг N на сосуд	меченый азот, % к общему	общий азот, мг N на сосуд	меченый азот, % к общему		
Экспозиция 24 часа, атом% избытка N^{15} в атмосфере — 1,15							
Клубеньки	5,5	13,5	53,0	34,4	10,3	47,9	10,7
Корни*	8,0	10,5	22,3	24,2	2,4	34,7	2,6
Корни**	50,0	31,2	10,3	67,4	0,0	98,6	3,2
Стебли	68,0	75,3	19,3	128,7	0,4	204,0	15,0
Листья	46,0	80,1	6,3	214,4	0,4	294,5	6,4
Итого	177,5					679,7	37,9
Экспозиция 72 часа, атом% избытка N^{15} в атмосфере — 1,03							
Клубеньки	5,3	13,4	41,7	37,3	25,3	47,7	14,35
Корни	7,9	10,7	33,0	24,5	6,0	36,2	5,01
Корни	42,0	30,9	23,0	8,1	4,9	99,0	10,64
Стебли	67,8	79,9	33,0	126,5	16,5	206,4	47,17
Листья	46,3	80,3	21,9	215,2	12,9	292,5	45,20
Итого	169,3					681,8	122,37

* Корни и их части, непосредственно прилегающие к клубенькам.
** Корни, более отдаленные от клубеньков.

в люпине, схема и ориентации которого приведены в таблице 7.

Эти опыты проводили в одно и то же время в вегетационном павильоне. Для затемнения растений на стеклянные камеры, в которые их помещали, навешивали черную хлопчатобумажную ткань. При нормальном освещении люпина происходила интенсивная фиксация азота, но она резко падала и практически совершенно прекращалась, когда растения как во время опыта, так и в течение 48 часов до начала опыта оставались без света.

Из результатов этих опытов следует, что свет необходим для образования в растениях веществ, при наличии которых только и возможна фиксация азота в клубеньковой ткани. Какова природа этих веществ, неизвестно, но речь может идти не только об углеводах. Во всех частях растений, даже в наихудшем ва-

Таблица 7

Влияние условий освещения на фиксацию атмосферного азота в клубеньках люпина при экспозиции его в атмосфере, обогащенной N_2^{15} в течение 48 часов

Фракции азота, выделенные из клубеньков люпина	Нормальное освещение		Темнота в течение всего экспериментального периода		Темнота до опыта в течение 48 часов и во время всего экспериментального периода	
	атом % избытка N^{15}	меченый азот, % к общему	атом % избытка N^{15}	меченый азот, % к общему	атом % избытка N^{15}	меченый азот, % к общему
Амидный азот клеточного сока клубеньков	0,46	65,2	0,20	27,7	0,03	4,1
Аминный азот клеточного сока клубеньков	0,20	27,7	0,08	11,1	0,02	2,8
Азот бактерий	0,14	19,4	0,02	2,8	0,01	1,4
Общее количество фиксированного за время опыта азота во всем растении, мг на сосуд	58,8		7,7		0,95	
Общее содержание моно- и дисахаридов во всех органах люпина, г/сосуд	7,11		5,9		3,61	

рианте при затемнении в течение 96 часов (48 часов во время опыта и 48 часов до опыта) к концу опыта оставалось еще весьма значительное количество углеводов (сумма моно- и дисахаридов); поэтому они не могли в данном случае лимитировать фиксацию. Следовательно, фиксацию азота в данном случае осуществляет какое-то другое вещество, синтезированное в растении только на свету. Постоянный приток этого вещества, которое мы для удобства обозначим как фактор А, в клубенек является непременным условием для осуществления процесса фиксации молекулярного азота в его ткани.

В изолированных от растений клубеньках фиксация азота может происходить в течение весьма ограниченного времени и только до тех пор, пока не будут израсходованы эти вещества (фактор А), поступившие ранее в клубенек из листьев высшего растения. Это подтверждено следующими данными таблицы 8.

В свежеотделенных от растений клубеньках фиксация азота, как это можно судить по содержанию в них изотопа N^{15}, резко падала, а в клубеньках, отделенных от растений за 24 часа до начала опыта, содержание меченого азота было столь низким, что оно немногим превышало возможную ошибку при изотопном анализе. Абсолютное отсутствие меченого азота в свежеотделенных от растения, но измельченных клубеньках показывает, что фиксация молекулярного азота в клубеньковой ткани сопря-

Таблица 8

Содержание меченого азота в амидной группе, выделенной из клеточного сока изолированных и не изолированных от растения клубеньков люцерны

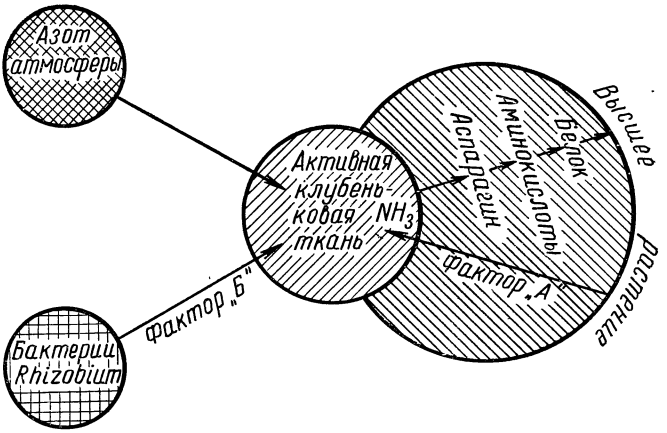
Условия опыта	Атом % избытка N^{15} в амидной группе		Меченый азот, % к общему амидному азоту	
	опыты			
	I	II	III	IV
Отделенные от растений клубеньки немедленно помещали в атмосферу, обогащенную N_2^{15}, на 24 часа	0,24	0,19	21,0	18,3
Клубеньки помещали в камеру с N_2^{15} через 24 часа после отделения их от растений	0,08	0,0	7,0	0,0
Отделенные от растений клубеньки немедленно измельчали и помещали в камеру с N_2^{15} на 24 часа	0,0	0,0	0,0	0,0
Клубеньки на растениях в естественном состоянии	0,64	0,44	56,5	40,0

жена с определенной ее структурой. Разрушение этой структуры исключает возможность осуществления фиксации азота.

Интенсивность фиксации азота в изолированных клубеньках, по-видимому, не лимитировалось недостатком углеводов. Проведенные исследования показали, что содержание суммы моно- и дисахаридов в немедленно отделенных от растений клубеньках в этих опытах составляло 2,67% сырого веса клубеньков. После 24-часовой экспозиции клубеньков в атмосфере меченого азота или в нормальной атмосфере влажной камеры содержание растворимых углеводов в клубеньках по понятным причинам уменьшилось и составляло в среднем из ряда опытов около 1,7% на сырой вес клубеньков. Это все же весьма значительная величина, поэтому не может быть речи о каком-либо недостатке углеводов для нормальной фиксации азота в клубеньке. Безусловно, что кроме углеводов, из листьев растений поступают в клубенек, какие-то другие вещества, наличие которых является обязательным для осуществления фиксации молекулярного азота на структурных элементах клубеньковой ткани.

Итоги проведенных исследований по изучению фиксации молекулярного азота в клубеньках бобовых растений могут быть выражены в виде следующей схемы (см. рис. 1).

Бактерии Rhizobium, проникая в корни бобовых растений, выделяют вещество (фактор Б), индуцирующее образование клубеньковой ткани, на поверхности которой и происходит фиксация атмосферного азота. Но этот процесс осуществим только в том случае, если клубеньковая ткань снабжается некоторым специфическим веществом (фактор А), синтезируемым на свету



Общая схема процесса фиксации атмосферного азота в клубеньках бобовых растений.

в листьях бобовых растений. Первым продуктом фиксации является аммиак, который быстро трансформируется в амидную группу аспарагина. Последний, являясь транспортной формой аммиака в растении, используется в синтезе аминокислот, которые в дальнейшем идут на построение белка как высшего растения, так и сожительствующих с ним бактерий.

Выводы

1. В проведенных опытах изучали интенсивность включения N^{15} в различные фракции азота, выделенные из отдельных органов люцерны, красного клевера, гороха и люпина, при экспозиции этих растений в атмосфере, обогащенной N_2^{15}, от 12 до 90 часов. В ходе исследований был разработан метод препаративного выделения бактерий Rhizobium из клубеньков, что позволило одновременно изучать также и скорость включения N^{15} в бактериальные клетки.

2. При относительно кратковременной экспозиции (12—24 часа) бобовых растений в атмосфере N_2^{15} фиксированный меченый азот обнаруживается в весьма высоких концентрациях только в клеточном соке клубеньковой ткани и в значительно меньших концентрациях в клеточном соке корней, стеблей и листьев растений. В клубеньковых бактериях Rhizobium меченый азот при экспозиции растений от 12 до 24 часов в атмосфере N_2^{15} совершенно отсутствует или содержится в ничтожных концентрациях, не выходящих за пределы допустимой ошибки эксперимента. Таким образом, фиксация атмосферного азота осуществляется не в клубеньковых бактериях, а в клубеньковой ткани высшего растения. Роль бактерий Rhizobium, по-види-

мому, заключается в том, что они индуцируют образование этой специфической клубеньковой ткани.

3. При более длительной экспозиции в атмосфере N_2^{15} меченый азот обнаруживается и в бактериях, но обогащение азота бактерий изотопом N^{15} и в этом случае значительно ниже, чем соответствующие величины, найденные для азота клеточного сока клубеньков и для азотистых фракций других органов высшего растения.

4. При затемнении растений интенсивность фиксации N_2^{15} в клубеньках бобовых растений резко падает и при более длительной экспозиции в темноте (72—90 часов) совершенно прекращается, несмотря на то что в растениях в этом случае могут присутствовать в значительных количествах растворимые углеводы.

5. В изолированных от растений клубеньках фиксация азота происходит значительно менее интенсивно и только в первые часы после отделения клубеньков от растения. В клубеньки, отделенные от растений за 24 часа до помещения в атмосферу N_2^{15}, или в измельченные клубеньки меченый азот практически не включается. Таким образом, фиксация атмосферного азота сопряжена с определенной структурой клубеньковой ткани, и для ее осуществления необходим приток каких-то специфических веществ из надземных органов высшего растения, для синтеза которых является необходимым наличие света.

6. Из всех азотистых соединений, содержащихся в клеточном соке клубеньков, максимальное обогащение изотопом N^{15} при любых сроках экспозиции растений в атмосфере N_2^{15} всегда обнаруживается в аспарагине. В аспарагиновой, глутаминовой и в других аминокислотах меченый азот содержится в значительно меньших количествах. Основная масса меченого азота в аспарагине находится в его амидной группе. Так как последняя может рассматриваться как трансформированный аммиак, то именно аммиак и является одним из первичных, если только не первым продуктом биологической фиксации атмосферного азота в клубеньках бобовых растений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчин Ф. В. Роль минерального и биологического азота в земледелии СССР. «Почвоведение» № 6, 1956.
2. Allison F. C. Can nodule bacteria of leguminous plants fix atmospheric nitrogen in the absence of the host. — «J. Agric. Research», 39, 893, 1930.
3. Aprison M. H., Magee W. E. and Burris R. H. Nitrogen fixation by excised soybeau root nodules. — «J. Biol. Chem.» 208, 1954.
4. Bond G. An Isotopic study of the fixation of nitrogen associated with nodulated plants of alnus. Myrica and Hippophae.— «J. of Exptl. Bot.» 6, 17, 303, 1955.
5. Burris R. H., Eppling F. I, Wahlin H. B. and Wilson P. W. Detection of nitrogen fixation with isotopic nitrogen. — «J. Biol. Chem.» 148, 349, 1943.

6. Machata M. A., Burris R. H. and Wilson P. Fixation of isotopic nitrogen by excised nodules. — «J. Biol. Chem.» 171, 605, 1947.
7. Sen S. P. and Burma D. P. A. Study with paper chromatography of the amino acids in legume nodules. — «Bot. Gaz.» 115, 190, 1953.
8. Zelitch J. Wilson P. W. and Burris R. H. The amino acid composition and distribution of N^{15} in soybeau root nodules supplied N^{15} enriched N_2. — «Plant Physiol» 37, 1, 1952.

ФИКСАЦИЯ АТМОСФЕРНОГО АЗОТА IN VITRO ФЕРМЕНТНЫМИ ПРЕПАРАТАМИ, ВЫДЕЛЕННЫМИ ИЗ КЛУБЕНЬКОВ БОБОВЫХ И ИЗ НЕИНФИЦИРОВАННЫХ БАКТЕРИЯМИ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ *

Изучение механизма биохимической фиксации азота в живой клетке сопряжено с труднопреодолимыми препятствиями вследствие быстрого включения фиксированного азота в общий метаболизм клетки. Не вызывает сомнений, что в раскрытии этого механизма был достигнут значительно большой прогресс, если бы ферментные системы, ответственные за фиксацию азота, могли быть изолированы от клетки. Попытки выделения азотфиксирующих ферментов впервые были предприняты А. Н. Бахом, З. В. Ермольевой и М. Н. Степаниан [1], в работе которых сообщалось о фиксации азота в препаратах сока, отжатого из растертых клеток Azotobacter chroococum. Однако проведенные в дальнейшем исследования не привели к положительным результатам. В 1960 г. Карнаганом с сотрудниками [4] был разработан метод извлечения из анаэробных азотофиксирующих бактерий Clostridium Pasterianum свободного от клеток экстракта, обладающего способностью к фиксации азота. Почти одновременно такой же метод был использован Беррисом и Вильсоном с сотрудниками [3, 5] для получения активных экстрактов из клеток как Cl. Pasterianum, так и другой азотфиксирующей бактерии Rhodospirillum rubrum.

В проведенных нами ранее исследованиях по симбиотической фиксации азота бобовыми [6] было найдено, что в первые часы экспозиции бобовых в атмосфере N_2^{15}, меченый азот обнаруживался в больших количествах в клеточном соке клубеньковой ткани и совершенно отсутствовал в выделенных из клубеньков бактериальных клетках Rhizobium. Отсюда следовало, что фиксация азота локализована не внутри бактериальных клеток, а в клубеньковых структурах, образование которых индуцировано вторжением в корни бобовых растений бактерий Rhizobium. Это побудило нас начать работы по выделению и изучению азотфиксирующих ферментов, присутствующих в клу-

* Статья написана в соавторстве с З. Н. Берсеневой и Г. Г. Жидких и опубликована в «Докладах АН СССР», т. 149, № 3, 1963.

беньках бобовых растений. В результате были разработаны следующие методы.

Отделенные от корней бобовых клубеньки замораживались жидким азотом и затем измельчались. Тонкоизмельченная масса клубеньков использовалась для извлечения азотфиксирующего фермента непосредственно или предварительно экстрагировалась ацетоном до полного обезвоживания и затем экстрагировалась эфиром. В последнем случае получался порошковый продукт, который потом использовался для извлечения фермента.

Измельченные клубеньки или полученный из них сухой порошок обрабатывались в течение 20 минут фосфатным буфером pH 6,8 с добавкой аскорбиновой кислоты, центрифугировались на суперцентрифуге с охлаждением в течение 15 минут при 10 000—12 000 g, и надцентрифужная жидкость, свободная от обломков тканей и клеток, использовалась для выделения фермента. Для этого к ней добавлялся насыщенный раствор сульфата магния с таким расчетом, чтобы содержание $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ в жидкости составляло около 30%. В этих условиях выпадает тонкий осадок белка (фермент А), который отделяется от раствора центрифугированием. В ряде опытов фермент А подвергался диализу против дистиллированной воды до полного удаления иона магния. Выход фермента очень мал: из 3 г сухой массы клубеньков люпина получалось 2,5—4,5 мг отдиализованного препарата фермента с абсолютным содержанием азота 0,4—0,7 мг. При кислотном гидролизе этого препарата в гидролизате хроматографическим методом были обнаружены аспарагиновая и глутаминовая кислоты, аланин, глицин, треонин, серин, метионин, валин, тирозин, триптофан, фенилаланин. Этот препарат фермента на данной стадии разработки нужно рассматривать не как чистый, индивидуальный фермент, а только как смесь белков, в составе которых представлен и азотфиксирующий фермент.

Кроме такого метода, применялся и другой — экстрагирование измельченной сухой массы клубеньков водным 60%-ным этиловым спиртом; полученный экстракт использовался в опытах в качестве источников азотфиксирующего фермента. Испытания активности выделенных препаратов производились в герметической камере в атмосфере, обогащенной N_2^{15}. Было найдено, что азотфиксирующая активность препаратов фермента заметно повышается при добавлении некоторых веществ, могущих служить в качестве активаторов фермента, переносчиков водорода, акцепторов продуктов ферментативного синтеза и источника энергии. В качестве таких веществ применялись магний, молибден, биотин, пируват, аскорбиновая кислота, АТФ. Все добавки вводились в камеру в буферном фосфатном растворе pH 6,8 при общем объеме жидкости 35—40 мл.

Препарат фермента, охлажденный до 0°С, буфер и добавки активаторов вводились в камеру, из нее эвакуировался воздух до остаточного давления 100 мм рт. ст., а затем камера заполнялась до 1 атм. газообразным азотом, обогащенным изотопом N^{15}. Обычно обогащение атмосферы в камере изотопом N^{15} (Z) было близким к 11,5, если принять за единицу содержание изотопа N^{15} в природном азоте. Камера помещалась в термостат с постоянной температурой 35°С. Во время опыта при помощи специального аппарата, установленного в термостате, камера непрерывно встряхивалась, что обеспечивало более интенсивный контакт фермента с атмосферой камеры. По окончании опыта содержимое камеры переносилось в колбу, куда добавлялось несколько миллилитров раствора NaOH, и отгонялся аммиак, находившийся в системе в виде аммонийных соединений, а также трансформированный аммиак, представленный в системе амидными группами глутамина и аспарагина. Отгоняемый аммиак улавливался 0,1 н. H_2SO_4, окислялся в вакууме (10^{-6}) гипобромитом натрия до элементарного азота, а затем определялся его изотопный состав на масс-спектрометре. В ряде опытов определялось также содержание азота и его изотопный состав в остатке после отгона аммонийного и амидного азота. В таблицах 1 и 2 приведены данные, характеризующие активность отдельных ферментных препаратов.

Меченый азот включался в значительных количествах в состав аммонийной и амидной фракций. Включение N^{15} в остаточную фракцию азота (аминокислоты и белок) в течение 30-минутной экспозиции не происходило или происходило в ограниченных размерах.

Таким образом, выделенные препараты фермента катализируют in vitro фиксацию атмосферного азота с образованием аммиака в качестве конечного неорганического продукта фиксации. Неизмельченные клубеньки, изолированные от корней люпина за 24 часа до опыта, и взвесь бактерий Rhizobium, выделенных из клубеньков люпина, не фиксировали азота. Удельная активность фермента обычно выражается числом оборотов, т. е. числом молей субстрата (в данном случае N_2), прореагировавшего за 1 минуту с одним молем фермента. Для тех случаев, когда молекулярный вес фермента неизвестен, его принимают за 100 000.

Следует отметить, что максимальное количество фиксированного азота в опытах Карнагана и в опытах Берриса и Вильсона достигало 244 μг на 100 мг белка при экспозиции в атмосфере N_2^{15} в течение 30 минут (Карнаган), что соответствует удельной активности, т. е. примерно в 170 раз меньше, чем у выделенных нами препаратов ферментов А (табл. 2).

Клубеньки бобовых представляют систему, включающую бактериальные клетки Rhizobium и перерожденную ткань высшего растения. Необходимо было установить, в какой части

Таблица 1

Фиксация атмосферного азота препаратами ферментов, выделенных из клубеньков люпина

Препараты	Сумма аммонийного и амидного азота в конце опыта			Азот остатка после отгона аммонийного и амидного азота		
	N, мг	обогащение изотопом N^{15}, Z	фиксировано N, µг	N, мг	обогащение изотопом N^{15}, Z	фиксировано N µг
Фермент А из свежезамороженных клубеньков люпина	1,06	6,62	564	0,78	1,04	0,0
	1,15	7,56	720	—	—	—
Фермент А из сухой массы клубеньков люпина, обработанных ацетоном и эфиром	0,64	6,07	310	0,45	1,03	0,0
Фермент А из клубеньков люпина, хранившихся в замороженном виде 20 дней	0,70	3,65	176	3,66	1,37	130
Спиртовой экстракт из сухой массы клубеньков люпина, обработанных ацетоном и эфиром	4,62	3,03	892	3,11	1,03	0,0
Цельные клубеньки через 24 часа после отделения от корней люпина	2,03	1,02	0,0	—	—	—
Бактерии Rhizobium, выделенные из свежих клубеньков люпина	2,1	1,02	0,0	—	—	—

Примечание. Количество фиксированного азота вычислялось по формуле: $\frac{(Z-1)\cdot 100 \times C}{(Za-1)\cdot 100}$, где $(Z-1)$ — обогащение N^{15} исследуемого препарата азота, $(Za-1)$ — обогащение N^{15} азота атмосферы, C — содержание азота в исследуемом препарате, µг.

этой системы продуцируются азотфиксирующие ферменты. Известно, что бактерии, изолированные от высшего растения, не могут фиксировать азот. Это было показано на огромном экспериментальном материале еще Аллисоном [7] и следует также из наших опытов. Не фиксируют азот и не инфицированные клубеньковыми бактериями бобовые растения. Но казалось невероятно, чтобы азотфиксирующие ферменты могли спонтанно заново возникнуть в клубеньках. Исходя из представлений о ферментах как специфических белках, природа которых определяется генами, присутствующими в хромосомах организма, следовало сделать заключение о наличии преобразованных азотфиксирующих ферментов или в высшем растении, или в бактериях. Причем ферменты эти представлены неактивной формой или обратимо инактивированы каким-то ингибитором. Если

Таблица 2

Удельная активность препарата фермента А, выделенного из клубеньков люпина. Экспозиция препарата 15 минут в атмосфере, обогащенной N_2^{15} (Z = 11,5)

	Опыт I	Опыт II
Вес препарата фермента (белка), мг	2,5	1,6
Аммиачный и амидный азот в конце опыта, мг	1,06	1,7
Обогащение (Z) изотопом N^{15}	6,62	4,12
Фиксировано меченого азота атмосферы, μг	570	320
Удельная активность фермента	55	48

допустить, что такой неактивный фермент присутствует в высшем растении, то превращение его в активную форму в результате вторжения бактерий Rhizobium в ткань высшего растения может оказаться возможным благодаря выделениям бактериями активирующих веществ или веществ, снимающих эффект ингибитора. Применяя описанные выше методы, нам удалось выделить соответствующие препараты из корней и листьев бобовых растений и из клеток клубеньковых бактерий. Результаты испытания азотфиксирующей активности этих препаратов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Фиксация атмосферного азота препаратами ферментов, выделенных из корней и листьев люпина и из бактериальных клеток Phizobiun trifolii. **Экспозиция 30 минут в атмосфере, обогащенной N_2^{15} (Z = 11,5)**

Препарат ферментов	Сумма аммонийного и амидного азота в конце опыта, мг	Обогащение изотопом N^{15} (Z)	Фиксировано N, μг
Фермент А, выделенный из корней люпина	1,12	2,43	152
Фермент А, выделенный из высушенных листьев люпина	1,12	4,02	318
Фермент А, выделенный из свежезамороженных и обработанных ацетоном и эфиром листьев люпина	1,14	5,03	451
Спиртовой экстракт из свежезамороженных и обработанных ацетоном и эфиром листьев люпина	1,68	5,03	677
Фермент А, выделенный из чистых культур бактерий Rhizobium trifolii, штамм 225	1,54	3,35	344
Спиртовой экстракт, выделенный из чистых культур бактерий Rhizobium trifolii штамм 225	0,98	5,55	425

Таким образом, и в неинфицированных корнях и листьях люпина, и в клубеньковых бактериях присутствуют ферменты, которые, будучи соответствующими приемами выделены из этих объектов, могут in vitro фиксировать свободный азот атмосферы. Возникает вопрос, присутствуют ли скрытые ферментные азотфиксирующие системы в других растениях, которые не способны к фиксации азота. Постановка такого вопроса кажется тем более оправданной еще и потому, что способностью к фиксации азота обладают не только избранные виды отдельных растений, но и, как показали Бонд [7], Гарднер и Бонд [8], такие растения, как ольха, вереск, болотный мирт и некоторые другие, имеющие на своих корнях клубеньковые структуры, образованные совершенно различными организмами (миксомицетами, грибами, плазмодием), также способны к фиксации азота. В таблице 4 приведены результаты испытаний активности препаратов фермента А, выделенных из листьев некоторых небобовых растений.

Таблица 4

Фиксация атмосферного азота ферментными препаратами, выделенными из листьев небобовых растений. Экспозиция 30 минут в атмосфере, обогащенной N_2^{15} (Z = 11,5)

Растения	Метод выделения ферментного препарата	Сумма аммонийного и амидного азота в конце опыта, мг	Обогащение изотопом N^{15}, Z	Фиксировано азота, γг
Озимая рожь (зеленая масса)	Фермент А	2,81	3,01	540
Береза (листья)		0,84	4,63	290
Шиповник (листья)		4,83	2,99	910
Тимофеевка (зеленая масса)		1,26	1,92	110
Бегония (листья)		0,70	5,42	295
Пшеница (зеленая масса)		0,75	2,89	135
Овес (зеленая масса)	Спиртовой экстракт	1,31	2,72	214
Табак (листья)		4,2	3,51	1010

Итак, ферментные препараты, выделенные из этих небобовых растений, в условиях описанных опытов могут фиксировать азот. По-видимому, и в других небобовых растениях присутствуют в неактивном состоянии азотфиксирующие ферменты, и, может быть, когда-нибудь удастся найти такие методы воздействия на растения, которые приведут в движение этот механизм и заставят его фиксировать атмосферный азот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бах А. Н., Ермольева З. В., Степаниан М. П., ДАН, 1, 1934.
2. Roberg M. Jahrb. f. Wiss. Bot 83, 567, 1936.
3. Burris R. H., Eppling F. G. et al. Y. Biol. Chem. 148, 349, 1943.

4. Carnahan I. E., Mortenson L. E. et al. Bioch et Biophys acta. 44, 520, 1960.
5. Schneider K. C., Bradbeer C. et al. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 46, 5, 726, 1960.
6. Турчин Ф. В. «Почвоведение» № 10, 1959.
7. Bond G. Advancement, Sci. 15, 60, 382, 1959.
8. Gardner I. C., Bond G. Canad. Y. Bot. 35, 305, 1957.

ПРЕВРАЩЕНИЕ АЗОТА В ПОЧВЕ ПО ДАННЫМ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗОТОПА N^{15} *

Азотное удобрение, внесенное в почву, подвергается усиленному воздействию со стороны населяющих ее микроорганизмов, которые в процессе своей жизнедеятельности используют или внесенный усвояемый азот на построение своих тел, или энергию, выделяющуюся при окислении аммиака в нитриты и нитраты. В конечном счете это приводит к изменению первоначальной доступности внесенного азота растениям и, возможно, к прямым потерям азота в результате улетучивания газообразных продуктов его превращения. Так как поступивший в почву из удобрений азот обычно составляет лишь незначительную долю общего азота почвы, то получение достаточно проверенных сведений о судьбе азотных удобрений в почве может дать только применение меченого источника азота.

В опытах, проведенных в нашей лаборатории для изучения превращения азотных удобрений в почве и степени использования их растениями, применялся сульфат аммония, меченный по N^{15}. Опыты проводились в условиях вегетационного метода в двух сериях **.

В первой серии опытов меченый сульфат аммония вносился в почву непосредственно перед посевом, а во второй — за 2 месяца до посева. Во время проведения второй серии опытов влажность почвы до посева поддерживалась все время на уровне 60% от ее влагоемкости. Во всех случаях вносилось в почву 0,45 г азота на сосуд с 10,3-кратным обогащением N^{15}, что составляло всего 15,91 мг избытка атомов N^{15}.

Опыты проводились одновременно на подзолистой суглинистой почве из Московской области, мощном черноземе из Украины, карбонатном сероземе из Средней Азии и красноземе из субтропических районов Закавказья. В качестве подопытного растения был взят овес.

---

* Статья написана в соавторстве с З. Н. Берсеневой, И. А. Корицкой, Г. Г. Жидких и Г. А. Лобовиковой и опубликована в книге: «Доклады советских почвоведов к VII Международному конгрессу в США». Изд-во АН СССР, М., 1960.

** Для опытов использовались сосуды размером 15 × 20 см.

По окончании вегетационного сезона были произведены соответствующие химические и изотопные анализы подопытных растений (включая надземные органы и корни) и почв.

Итоговые данные этих опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Степень использования растениями меченого азота сульфата аммония и размеры потерь его в почве за вегетационный период, % от исходного количества

Почва	Сроки внесения $(N^{15}H_4)_2SO_4$	Азот в растении	Азот в почве	Потери азота
Подзолистая суглинистая	В день посева	64	21	15
То же	За 2 месяца до посева	56	22	22
То же + $CaCO_3$ по гидролитической кислотности	В день посева	68	20	12
То же	За 2 месяца до посева	61	20	19
Мощный чернозем	В день посева	66	17	17
» »	За 2 месяца до посева	60	16	24
Типичный серозем	В день посева	72	17	11
» »	За 2 месяца до посева	62	16	22
Краснозем + $CaCO_3$ по обменной кислотности	В день посева	51	32	17
То же	За 2 месяца до посева	28	42	30

Коэффициент использования растениями азота, внесенного с удобрением, для большинства почв колеблется в пределах 56—72% и только для краснозема — почвы, богатой собственными запасами усвояемого азота, этот коэффициент был значительно ниже.

Для всех почв степень использования растениями внесенного азота закономерно падала при заблаговременном его внесении до посева. Как видно из данных таблицы 1, во всех случаях в конце опыта в системе почва — растение было найдено меньше N^{15}, чем его было внесено в начале опыта.

Размеры потерь достигают значительно бо́льших величин при оставлении почвы в парующем состоянии, без растений, когда внесенные удобрения остаются полностью под влиянием почвенных микроорганизмов.

Обычно потери азота из почвы связываются с денитрификационными процессами. Однако последние, как правило, достаточно резко проявляются только в анаэробных условиях. Нам представляется более вероятным, что эти потери происходят при нитрификации аммиака, когда в почве создаются очаги местного подкисления и азотистая кислота, образующаяся при окислении аммиака, может поэтому частично распадаться с образованием летучих окислов азота и азотной кислоты: $3HNO_2 \rightarrow 2NO + HNO_3 + H_2O$. Именно такой процесс проис-

ходит при внесении нитритов в кислую почву, когда теряется от 20 до 50% всего внесенного в почву нитритного азота (Турчин, 1953). И нет ничего невероятного в том, что нечто подобное происходит и при нитрификации аммиака не только в кислых, но и в нейтральных почвах при местном, очаговом подкислении почвы.

Применение изотопной техники позволяет также определить, в какой степени внесение азотного удобрения сказывается на использовании растениями почвенного азота. Соответствующие данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние внесенного азотного удобрения с $(N^{15}H_4)_2SO_4$ 10,3-кратным обогащением на использование растениями почвенного азота

Почва	Сроки внесения $(N^{15}H_4)_2SO_4$	Использование растениями азота, мг N на сосуд		Азот растений в контрольных вариантах (без N^{15}) в мг N на сосуд
		из внесенного удобрения	из почвы	
Подзолистая суглинистая	В день посева	298	255	175
То же	За 2 месяца до посева	252	242	209
То же + $CaCO_3$	В день посева	308	294	205
То же	За 2 месяца до посева	272	321	294
Мощный чернозем	В день посева	291	195	114
То же	За 2 месяца до посева	272	221	150
Краснозем	В день посева	232	308	490
То же	За 2 месяца до посева	130	298	420

Внесение азотного удобрения на подзолистой почве и черноземе приводило к заметному усилению использования растениями почвенного азота, тогда как на красноземе при внесении азотного удобрения степень использования растениями почвенного азота упала.

Эти различия обусловлены неодинаковой обеспеченностью исследуемых почв собственными исходными запасами усвояемого почвенного азота.

Не использованный растениями и оставшийся в почве меченый азот сульфата аммония к концу опыта на почвах — подзолистой, черноземе и сероземе — практически полностью перешел в неусвояемую растениями органическую форму (в почвенный гумус).

Во всех случаях в органическое вещество почвы в результате воздействия микроорганизмов перешло около 20% от внесенного в почву исходного количества меченого азота. Опыты, в которых одновременно с меченым источником минерального азота (обычно $(N^{15}H_4)_2SO_4$) вносилась в качестве энергетического и углеродистого материала измельченная овсяная солома,

показывают, что в этом случае основная масса меченого минерального азота превращается в почве в органическую форму.

Гумифицированные форменные элементы в основном представляют не что иное, как скопление отмерших микробных клеток вокруг не полностью разложившихся измельченных частичек соломы, служившей в свое время источником углерода для микроорганизмов.

При высоком содержании в почве скоплений отмерших микроорганизмов представляло интерес более подробно исследовать их состав. Мы решили для этих целей использовать метод Шмидта и Таннхаузера, позволяющий количественно выделить из исследуемых объектов белки, нуклеиновые кислоты и некоторые другие составные части. Выделенные фракции исследовались на содержание азота и его изотопный состав.

Соотношение между белками и нуклеиновыми кислотами в этих частицах близко к соотношениям, указанным в литературе для бактериальных клеток. Примерно одинаковые величины обогащения изотопом N^{15} отдельных фракций белка и нуклеиновых кислот указывают на синхронность их образования в достаточно однородных по своему составу микроорганизмах.

Метод фракционированного разделения Шмидта и Таннхаузера был использован нами также для выделения из основной массы почвы отдельных групп белка и нуклеиновых кислот.

Так же как и для отмерших бактериальных клеток, изотопный состав азота белков и нуклеиновых кислот, выделенных из основной массы органического вещества почвы, характеризуется достаточной однородностью, свидетельствующей об одновременном включении внесенного меченого азота в эти фракции.

Весьма интересным оказалось, что в процессе нитрификации аммиака в почве, помимо обычных продуктов этого процесса — нитритов и нитратов, образуются также нерастворимые в воде. слабых кислотах и щелочах окисленные соединения азота, вероятно, нитросоединения. Это удалось установить следующим образом: навеска почвы, инкубировавшейся в течение определенного времени с N^{15}, после многократного промывания водой и слабыми кислотой и щелочью, помещалась в отгонную колбу, при добавлении воды и щелочи отгонялся аммиак, который отщеплялся в результате омыления амидных групп. После окончания отгона аммиака («омыляемого азота») в колбу вводился сплав Деварда и отгонялся аммиак, образовавшийся в результате восстановления окисленных соединений азота.

Для нерастворимого окисленного азота было найдено значительно более высокое обогащение изотопом N^{15}, чем для омыляемого азота. Это подтверждает, что окисленный нерастворимый азот образовался на первых ступенях превращения в почве внесенного $(N^{15}H_4)_2SO_4$, т. е. в процессе его нитрификации.

В почве под растениями окисленный нерастворимый азот обнаруживается в меньших количествах, чем в парующей почве. Так, в опытах на сероземе содержание меченого окисленного азота в почве после снятия урожая составляло около 1,0% общего количества N^{15} в этой почве, т. е. в 5 раз меньше, чем в парующей. Отсюда ясно, что нерастворимый окисленный азот в большей мере доступен растениям, чем азот остальной массы органического вещества почвы.

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПА N^{15} В АГРОНОМИЧЕСКОЙ ХИМИИ *

Использование стабильного изотопа N^{15} в агрохимических и биохимических исследованиях имеет известное преимущество перед другими радиоактивными изотопами, заключающееся в том, что N^{15} по своему действию на живой организм в любой концентрации ничем не отличается от обычного азота. Как известно, обычный природный азот с атомным весом 14,008 является комплексным элементом, представляющим смесь двух изотопов с массовыми числами 14 и 15. Соотношение между ними в природе строго постоянно: 99,61% N^{14} и 0,39% N^{15}.

Если принять за единицу это соотношение, то всякий избыток атомов N^{15} характеризует степень обогащения данного соединения изотопом N^{15}. Применяя в опытах меченные по N^{15} азотные удобрения, мы получили информацию о скорости поступления азота и его передвижения по отдельным органам растения, об использовании его на синтез аминокислот, белка и других веществ в растении, о судьбе внесенного азотного удобрения в почве и т. д. [4—5].

Полученные данные указывают прежде всего на исключительно высокую интенсивность обмена азотных веществ в растении. Первая стадия в усвоении растениями минеральных соединений азота (нитратов или аммонийных солей) — поступление их в растение — происходит с весьма высокой скоростью.

Поступивший в растение минеральный азот сразу же используется на синтез аминокислот в корнях растений. При снабжении растений аммонийными соединениями азота в дозах, обычно применяющихся в практических условиях, переработка его в аминокислоты полностью завершается в корнях растений и в листья уже поступают готовые аминокислоты, которые используются здесь на синтез белка. Нитратные соединения азота, прежде чем пойти на синтез органических веществ, должны предварительно восстановиться в растении, поэтому использование нитратов в корнях на синтез аминокислот проис-

---

* Статья опубликована в Журнале Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. Т. VII, № 5, 1962.

ходит только в меру их восстановления в аммиак, значительная часть поступивших в корни нитратов достигает листьев, где они после восстановления используются на синтез аминокислот.

Переработка аммонийного азота в аминокислоты характеризуется весьма высокой скоростью. В таблице 1 приведены результаты одного из опытов, в котором изучалась скорость образования аминокислот в корнях и листьях молодых растений овса при подкормке их сульфатом аммония с 30-кратным обогащением изотопом N^{15}.

Таблица 1

Интенсивность включения меченого азота в состав аминокислот молодых растений овса

Время, истекшее после внесения меченого сульфата аммония	Обогащение азота аминокислот изотопом N^{15}		% меченого N в составе аминокислот	
	корни	листья	корни	листья
15 мин.	3,91	1,00	10,0	0,0
30 „	4,09	1,00	10,7	0,0
2 часа	5,90	1,56	16,9	1,9
6 часов	12,25	4,01	42,4	10,4
24 часа	14,50	8,18	45,0	24,8
48 часов	17,80	16,40	58,0	53,0

Приведенные здесь данные обогащения указывают, во сколько раз в азоте исследуемых объектов содержится больше атомов N^{15}, чем в природном азоте.

Процент меченого азота в исследуемом объекте вычисляется по формуле

$$\frac{Z-1}{Z_1-1}\cdot 100,$$

где Z_1 — обогащение N^{15} исходного источника азота, взятого для подкормки растений, Z — обогащение исследуемого соединения азота. За единицу принимается содержание N^{15} в обычном азоте (0,39%).

Данные таблицы 1 показывают, что потребовалось очень немного времени для того, чтобы корни растений могли извлечь из почвы и переработать в аминокислоты достаточно значительные количества минерального азота: уже через 15 минут после внесения меченого сульфата аммония его азот был обнаружен в корнях растений в составе аминокислот. В дальнейшем содержание меченого азота в составе аминокислот корней непрерывно возрастало, что свидетельствует о непрекращающемся их новом синтезе за счет внесенного в подкормку меченого азота сульфата аммония.

Синтезированные в корнях аминокислоты непрерывно отводятся в надземные органы растений. Передвижение аминокислот из корней в листья требует известного времени. В данном опыте для этого требовалось около двух часов. Исследования, проведенные с применением хроматографического метода, показали, что синтез отдельных аминокислот за счет поступившего в растения неорганического азота (аммиачного или нитратного, безразлично) осуществляется в определенной последовательности.

Первой аминокислотой, образующейся в корнях растений сразу же после внесения азотной подкормки, является аланин, затем через сравнительно короткое время образуются дикарбоновые аминокислоты (аспарагиновая и глутаминовая кислоты), но в значительно меньшем количестве, чем аланин. Синтез диаминокислот и ароматических аминокислот происходит в значительно более поздние сроки и главным образом в листьях, по-видимому, за счет аминных групп аланина и дикарбоновых аминокислот в результате реакций переаминирования.

Тот факт, что первой аминокислотой, синтезируемой растениями за счет переработки аммиака, является аланин, по-видимому, обусловлен тем, что в растениях в качестве постоянного метаболита в процессе дыхания всегда образуется пировиноградная кислота, которая при взаимодействии с аммиаком очень легко дает аланин.

Исследования с применением N^{15} показывают, что меченый азот может быть обнаружен в значительных количествах в составе белков уже в первые сутки после внесения меченой азотной подкормки, как это видно из данных таблицы 2.

Таблица 2

Динамика включения меченого азота в азот аминокислот и белков листьев молодых растений овса

Продолжительность экспозиций растений на меченом сульфате аммония с 30-кратным обогащением изотопом, час.	Обогащение изотопом N^{15}		% меченого азота		% обновления азота белка
	аминокислоты	белки	аминокислоты	белки	
6	4,01	1,37	10,4	1,3	12,2
24	8,18	2,49	24,8	5,2	20,8
48	16,40	8,72	53,0	26,7	50,2

При вычислении процентного содержания меченого азота за 100 принималась величина обогащения изотопом N^{15} сульфата аммония, применявшегося для подкормки. Процент меченого азота во фракции аминокислот одновременно выражает степень обновления азотистого состава аминокислот, так как для их синтеза непосредственно используется внесенный в под-

кормку аммиачный азот сульфата аммония. Но на синтез белков используется не аммиак как таковой, а продукты его переработки, т. е. аминокислоты. Следовательно, при вычислении степени обновления белка мы должны исходить из экспериментально найденной на каждый момент степени обогащения изотопом N^{15} аминокислотной фракции азота, принимая эту величину за 100 и относя к ней экспериментально найденную величину обогащения изотопом N^{15} белковой фракции азота.

Как видно, азотистый состав белка в течение 48 часов обновился примерно наполовину, так как около 50% всех атомов азота белка за 48 часов после внесения меченого сульфата аммония было замещено «новыми» мечеными атомами азота.

Проводившиеся одновременно химические анализы растений показали, что общее количество белкового азота как в этом, так и в другом аналогичном опыте за столь короткие промежутки времени практически почти совсем не изменялось или изменялось на сравнительно незначительную величину (в пределах 5—10%). Это свидетельствует о том, что в растениях, кроме образования нового количества белка, постоянно происходит обновление уже содержащегося в растении белка. Таким образом, молекулы белка в организме растений имеют сравнительно небольшую продолжительность жизни. Они непрерывно разрушаются и вновь воссоздаются в процессе интенсивного обмена веществ растений.

Скорость обновления белка может быть рассчитана по такому уравнению:

$$И = \frac{Z_Б^{(t)} - Z_Б^{(0)}}{\int_0^{(t)} \left[Z_A^{(t)} - Z_Б^{(t)}\right] dt},$$

где И — средний коэффициент обновления за время от 0 до t;

Z_A — обогащение изотопом N^{15} азота аминокислот;

$Z_Б$ — обогащение изотопом N^{15} азота белка.

В ряде опытов, проведенных с различными растениями, было показано, что наиболее интенсивно протекает процесс обновления белка в листьях молодых растений. В этих опытах средняя скорость обновления, выражаемая величиной коэффициента И, колебалась в пределах 0,015—0,02 в час. При такой скорости «период полуобновления» белка t (время, в течение которого обновляется половина всех молекул), исходя из соотношения $T = \frac{1n2}{И}$, был равен 35—40 часам. Это намного превышает скорость обновления белка в организме животного, где, по данным Спринсона и Риттенберна, 1948 г. [6], а также Бартлета и Геблера, 1952 г. [7], период полуобновления белка, вычисленный по результатам опытов с введением в пищу глицина, меченного по N^{15}, колеблется в пределах 17—18 дней.

Столь высокая скорость обновления белка в высших растениях, по-видимому, связана с автотрофным типом питания, определяющим высокую интенсивность обмена веществ в растительной клетке. По мере старения растений интенсивность обновления белка падает. Такое же явление наблюдается и при неблагоприятных условиях роста растений, например при недостатке элементов питания, при неудовлетворительном водном режиме, при избыточной кислотности среды и т. п.

Синтез белка и его обновление в растениях тесно связаны с процессом фотосинтеза.

В живой растительной клетке в пластидах хлорофилл находится в виде комплекса его с белком и липоидами, и одновременно с обновлением белка происходит и обновление хлорофилла. Таким образом, молекулы хлорофилла, так же как и белковые молекулы, постоянно разрушаются и вновь синтезируются. Скорость обновления молекул белка и хлорофилла выражается величинами одного порядка.

При экспозиции растений в темноте в отсутствие сахаров нового синтеза белка и его обновления не происходит [8]. В этих условиях происходит только непрерывный распад белка до аминокислот, а при более длительной экспозиции растений в темноте происходит дезаминирование аминокислот с образованием в качестве продукта их распада — аммиака. Одновременно с распадом белка происходит и распад хлорофилла. Это можно видеть из данных таблицы 3.

Таблица 3

Азотный обмен в молодых растениях овса на свету и в темноте

	Свет			Темнота		
	аминокислоты	белок	хлорофилл	аминокислоты	белок	хлорофилл
Общее содержание в растениях:						
а) в начале опыта (исходные растения на свету)	100	100	100	100	100	100
б) через 72 часа	114	105	104	215	60	65
Обогащение изотопом N^{15} через 72 часа от начала опыта	5,03	2,63	2,22	2,02	1,03	1,02
Процент обновленного азота белка и хлорофилла через 72 часа от начала опыта	—	40,5	32,0	—	0	0

В темноте меченый атом включался только в состав аминокислот, для синтеза которых наличие света не является необходимым, содержание же меченого атома в белке и хлорофилле в темноте ничтожно мало и не выходит за границы возможной ошибки эксперимента.

Прекращение синтеза белка и хлорофилла в темноте в значительной мере обусловлено тем, что в этих условиях в растениях не образуются сахара, наличие которых является необходимым для синтеза как белка, так и хлорофилла. В ряде опытов, где исходные растения характеризовались весьма высоким содержанием сахаров, в первое время их экспозиции в темноте распада белка и хлорофилла не наблюдалось. Только после того, как первоначальные запасы сахаров в растениях были истощены, начинался процесс распада белка и хлорофилла.

Опытами, проведенными в строго контролируемых условиях, установлено, что степень обеспеченности растений сахарами имеет наибольшее значение не для начальных этапов усвоения неорганического азота растениями, а для конечного этапа переработки азотистых соединений, для синтеза белка. В среднем из ряда опытов установлено, что синтез 1 г белка в растениях сопровождается затратами примерно 5 г сахара. По-видимому, синтез белка сопровождается интенсивным окислением сахара, в результате которого освобождается энергия, необходимая для активации молекул аминокислот, вступающих в реакцию синтеза белка.

Применение изотопа N^{15} при изучении биологической фиксации атмосферного азота в клубеньках бобовых позволило установить новые положения о механизме этого процесса [9]. Был разработан метод препаративного выделения бактерий из клубеньков бобовых, и это позволило детально изучить распределение меченого азота как в отдельных фракциях и органах высшего растения, так и в клубеньковых бактериях.

Бобовые растения — горох, клевер, люцерна — в этих опытах выращивались в обычных вегетационных сосудах, и в период наиболее интенсивной фиксации атмосферного азота сосуды с растениями помещались в специальную стеклянную камеру, куда вводился газообразный азот, обогащенный изотопом N^{15}.

В результате этих исследований было найдено, что фиксированный бобовыми меченый газообразный азот атмосферы первоначально в больших количествах содержится только в клеточном соке клубеньковой ткани, представляющей гипертрофированную корневую ткань бобовых, откуда он затем постепенно переходит в другие органы растений. В клубеньковых бактериях меченый азот при экспозиции растений от 6 до 48 часов совершенно отсутствует или содержится в крайне незначительных количествах, обычно не выходящих за пределы возможной ошибки эксперимента (табл. 4).

Только при длительной экспозиции люцерны в атмосфере N^{15} (90 часов) меченый азот был обнаружен в некоторых количествах в бактериях, но концентрация его и в этом случае была намного ниже, чем в клеточном соке клубеньковой ткани или в составе азотистых фракций других органов растения.

Таблица 4

Обогащение изотопом N^{15} и содержание меченого азота в клубеньковых бактериях и в клеточном соке клубеньковой ткани корней люцерны

Экспозиция на N^{15}, часы	Бактерии		Клеточный сок клубеньковой ткани	
	обогащение изотопом N^{15}	% меченого N к общему его содержанию	обогащение изотопом N^{15}	% меченого N к общему его содержанию
12	1,02	0,9	1,67	22,4
24	1,07	1,9	2,14	30,8
48	1,10	2,7	2,03	28,0
90	1,18	4,9	2,06	28,6

Это указывает, что фиксированный меченый азот попадает в тела бактерий из тканей высшего растения, которое является источником азотного питания для бактерий. Таким образом, фиксация атмосферного азота локализована не в теле клубеньковых бактерий, а в клубеньковой ткани высшего растения. Важная роль клубеньковых бактерий заключается в том, что они индуцируют образование этой специфической клубеньковой ткани. Дальнейшие исследования показали, что максимальное содержание меченого азота в отдельных азотистых фракциях клеточного сока клубеньков всегда приходится на амидную группу аспарагина и глутамина. Так как эта группа может рассматриваться как трансформированный аммиак, то именно аммиак и является конечным неорганическим продуктом биологической фиксации азота.

Применение изотопа N^{15} при изучении превращения азотных удобрений в почве [10] позволило установить следующие положения.

Из внесенного в почву азота меченого азотного удобрения растения за один сезон используют от 50 до 75%.

От 10 до 35% от общего количества внесенного азота приходится на прямые его потери из почвы, происходящие в результате микробиологических процессов. При этом размер потерь зависит от времени внесения азотных удобрений; минимальные потери были в том случае, когда удобрения вносились одновременно с посевом; при внесении азота в почву за 2 месяца до посева эти потери значительно возрастали и были наиболее высокими при внесении удобрений за год до посева.

Около 20% от внесенного азота использовалось почвенными микроорганизмами на построение их тела и таким образом превращалось в азот органического вещества почвы. Изучение степени минерализации и доступности растениям меченого азота, трансформированного в почве в органическую форму, показало, что на второй год после его внесения минерализовалось

и использовалось растениями около 10% от всего перешедшего в органическое вещество почвы (т. е. в микробную плазму) меченого азота. Интенсивность минерализации этого азота оказалась примерно в 15 раз выше в сравнении с основным фондом «старого» органического азота почвы.

Внесение меченного по N^{15} сульфата аммония на всех исследованных почвах вызывало весьма значительное увеличение степени использования растениями природного азота почвы. Это можно объяснить тем, что образующиеся при нитрификации сульфата аммония (и вообще любого нитрифицирующего источника азота) кислотные продукты усиливают гидролиз органического почвенного азота и тем самым повышают его подвижность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов А. В. Вестник АН СССР, № 9, 1953.
2. Соколов А. В. Доклады СССР на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. М., 1955.
3. Соколов А. В. «Почвоведение», № 2, 1958.
4. Турчин Ф. В., Гуминская М. А., Плышевская Е. Г. Изв. АН СССР, сер. биол № 6, 1953.
5. Турчин Ф. В., Гуминская М. А., Плышевская Е. Г. Доклады сессии АН СССР по мирному использованию атомной энергии, М., 1955.
6. Sprinson D., Rittenberg D. J. Biol. Chem. 180, 2, (1949).
7. Bartet P. D., Gaebur O. H. ibid 196, 1 (1953)
8. Годнев Т. Н., Турчин Ф. В., Шлык А. А. Доклады Международной конференции по применению радиоизотопов в научных исследованиях Лондон, 1957.
9. Турчин Ф. В., «Почвоведение», № 10, 1959.
10. Турчин Ф. В., Берсенева З. Н., Корицкая И. А., Жидких Г. Г., Лобовикова Г. А. Доклады VII Международного конгресса по почвоведению. Медисон, США, 1960.

ПРЕВРАЩЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ В ПОЧВЕ И УСВОЕНИЕ ИХ РАСТЕНИЯМИ*

Внесенное в почву удобрение используется не только растениями, но и почвенными микроорганизмами, которые или используют усвояемый азот удобрения на построение своих тел, или используют нитраты как источник кислорода в процессе дыхания. В конечном счете это приводит к изменению первоначальной доступности азотного удобрения растениям, а также к прямым потерям азота в результате улетучивания газообразных продуктов его превращения.

На значительные потери азота в почве указывается в работах [1—4], авторы которых использовали изотопную тех-

* В проведении исследований, кроме автора, участвовали сотрудники лаборатории азота З. Н. Берсенева, М. А. Гуминская, И. А. Корицкая, Г. Г. Жидких, Г. А. Лобовикова. Статья опубликована в журнале «Агрохимия» № 3, 1964.

нику, а также в работе Arnold [5], который непосредственно определял выделяющиеся из почвы окислы азота.

Важно выяснить, в какой мере азот удобрения после его превращения в почве в органическую форму может служить источником питания растений как непосредственно в год внесения удобрений, так и в последующие годы.

Для изучения усвояемости поглощенного микроорганизмами меченого азота сульфата аммония в год его внесения был проведен следующий опыт.

Таблица 1

Мобилизация азота, поглощенного почвенными микроорганизмами из меченого азотного удобрения в год его внесения

Варианты опыта	Избыток атомов N^{15} в усвояемой фракции азота в почве на 6/VII, мг	Избыток атомов N^{15}, усвоенных растениями в период с 6/VII до конца опыта (20/IX)	Избыток атомов N^{15}, перешедший из органической в усвояемую форму азота в период с 6/VII до конца опыта	
			мг	% к исходной дозе N^{15}
РК + N^{15}	0,95	3,51	2,56	5,1
РК, аммонизированный торф + N^{15}	6,57	8,91	2,34	4,7
РК, торф + N^{15}	1,19	4,16	2,97	5,9

Меченый сульфат аммония (обогащение изотопом N^{15} — 16,56% избытка атомов N^{15}) вносился перед посевом растений яровой пшеницы в почву (дерново-подзолистая суглинистая известкованная почва) в дозе 0,3 г N на сосуд. Во время колошения (6/VII), когда можно было предполагать, что основная масса усвояемого азота в почве была уже использована растениями, производилась уборка урожая в трех параллельных сосудах, а в трех других параллельных сосудах (опыт проводился в шестикратной повторности) растения оставались до полного созревания. Почва и растения в I (6/VII) и во II (20/IX) сроки уборки подвергались анализу на содержание N^{15}. Опыт проводился на известкованном подзолистом суглинке без применения и с одновременным применением органических удобрений. Основные результаты приведены в таблице 1.

Применение изотопа N^{15} позволило установить весьма важную особенность во взаимодействии азотных удобрений с почвой. Оказалось, что внесение азотных удобрений на всех почвах вызывает значительное увеличение степени использования растениями природного азота почвы.

Это можно видеть из опыта, где в качестве меченого азотного удобрения применялся сернокислый аммоний (табл. 2).

Как следует из данных таблицы 2, при внесении в почву меченого сернокислого аммония в дозах от 0,3 до 0,5 г N на

Таблица 27

Влияние внесенного $N^{15}(NH_4)_2SO_4$ на использование растениями почвенного азота

Почва, растение и доза меченого азота	Общий вынос азота урожаем растений (надземная масса + + корни), мг/кг	Меченый азот, % к общему азоту растений	Использовано растениями, мг		Азот в урожае контрольных вариантов
			из $(NH_4)_2SO_4$	из азота почвенного фонда	
Подзолистый суглинок, овес, 0,45 г N	553	54	298	255	175
То же + $CaCO_3$, овес, 0,45 г N	602	51	308	294	205
Мощный чернозем, овес, 0,45 г N	486	60	291	195	114
Серозем, овес, 0,45 г N	651	50	326	325	236
Известкованный подзолистый суглинок, пшеница, 0,5 г N	533	60,5	322	211	145
То же, кукуруза, 0,3 г N	420	42	181	239	192

сосуд усвоение растениями почвенного азота не только не падало, а, наоборот, значительно возрастало в сравнении с контрольными вариантами. Это кажется несколько странным, так как в почве контрольных вариантов во время роста растений или после снятия урожая никогда нельзя было обнаружить даже следов усвояемого азота. В то же время удобренные азотом растения обычно использовали примерно в полтора раза больше почвенного азота, чем неудобренные растения.

Так как в этих опытах применялся в качестве меченого источника азота сернокислый аммоний, то повышение доступности растениям почвенного азота можно было в известной мере связать с положительным влиянием нитрификации аммиачного азота на мобилизацию почвенного азота. Действительно, было показано, что при нитрификации в почве мочевины или какого-либо другого аммиачного удобрения происходит некоторая мобилизация органического азота. Это видно из следующего опыта.

В почву вносились корни, стебли и листья созревших растений ржи, меченных изотопом N^{15}. Так как соотношение между углеродом и азотом в корнях и стеблях особенно неблагоприятно для минерализации органического азота этих материалов, то нитрификация их происходила крайне слабо и общее количество атомов N^{15} в составе нитратной фракции в почве было ничтожно малым. Когда же одновременно с этими материалами вносилась обычная, немеченая, легко нитрифицируемая мочевина или какая-либо другая аммонийная форма немеченого азотного удобрения, то в составе нитратной фракции находилось большое количество атомов N^{15}, чего не могло быть, если бы содержащие избыток атомов N^{15} солома или корни

не нитрифицировались под влиянием развивающегося процесса нитрификации, начавшегося с легко нитрифицируемого азотного удобрения и охватившего также и более инертное органическое вещество соломы или корней (табл. 3).

Таблица 3

Влияние (немеченой) $CO(NH_2)_2$ на нитрификацию меченного изотопом N^{15} органического азота

Внесены в почву	Найдено в почве избытка атомов N^{15} через 6 месяцев, мкг		Органический азот, нитрифицировавшийся в результате внесения 0,2 г N в $CO(NH_2)_2$	
	в нитратах*	в органическом азоте	мкг N^{15}	мг N
Корни ржи, меченные N^{15}, 0,2 г N; 7,9 мг избытка атомов N^{15}	43	6420	—	—
То же + $CO(NH_2)_2$ — 0,2 г N	847	5195	804	20,4
Стебли ржи, меченные N^{15} — 0,15 г N; 6,99 мг избытка атомов N^{15}	31	4930	—	—
То же + $CO(NH_2)_2$ — 0,2 г N	770	4080	739	16,0
Листья ржи, меченные N^{15} — 0,2 г N; 11 мг избытка атомов N^{15}	1795	6570	—	—
То же + $CO(NH_2)_2$ — 0,2 г N	3100	5220	1305	23,6

* Включая и аммиачный азот, который был представлен в этом опыте в крайне незначительных количествах; чтобы не загромождать таблицу, данные по аммиачному азоту не выделены в отдельную колонку.

Таким образом, при длительном компостировании мочевины с органическими материалами единица азота мочевины вызывала мобилизацию примерно 0,1 единицы органического азота.

По данным таблицы 2, внесение в почву 0,45—0,5 г азота сульфата аммония вызывало дополнительную мобилизацию от 50 до 100 мг, т. е. в отдельных опытах в присутствии растений влияние аммиачного удобрения на мобилизацию почвенного азота проявлялось значительно резче, чем в парующих компостах.

Результаты опытов по изучению азотного питания растений с применением изотопа N^{15} указывают прежде всего на исключительно высокую интенсивность обмена азотистых веществ в растении. Первая стадия в усвоении растениями минеральных соединений азота (нитратов или аммонийных солей) — поступление их в растение — происходит с весьма высокой скоростью.

Поступивший в растение минеральный азот сразу же используется на синтез аминокислот в корнях растений. При снабжении растений аммонийными соединениями азота в дозах, обычно применяющихся в практических условиях, переработка его в аминокислоты полностью завершается в корнях растений,

и в листья уже поступают готовые аминокислоты, которые используются здесь на синтез белка. Нитратные соединения азота, прежде чем пойти на синтез органических веществ, должны предварительно восстановиться в растении до аммиака, поэтому использование нитратов в корнях на синтез аминокислот происходит только в меру их восстановления в аммиак, значительная же часть поступивших в корни нитратов достигает листьев, где они после восстановления используются на синтез аминокислот.

Таблица 4

Интенсивность включения меченого азота в состав аминокислот молодых растений овса

Время после внесения меченого сернокислого аммония	Обогащение азота аминокислот изотопом N^{15} (Z) *		Меченый N в составе аминокислот, %	
	корни	листья	корни	листья
15 мин.	3,91	1,00	10,0	0,0
20 „	4,09	1,00	10,7	0,0
2 часа	5,90	1,56	16,9	1,9
6 часов	12,25	4,01	42,4	10,4
24 часа	14,50	8,18	54,0	24,8
48 часов	17,80	16,40	58,0	53,0

* Величина Z показывает, во сколько раз содержание атомов N^{15} больше, чем в природном азоте, % N^{15} в котором (0,39) принят за единицу.

Переработка аммонийного азота в аминокислоты характеризуется весьма высокой скоростью. В таблице 4 приведены результаты одного из опытов, в котором изучалась скорость образования аминокислот в корнях и листьях молодых растений овса при подкормке их меченым сульфатом аммония.

Эти данные показывают, что потребовалось очень немного времени для того, чтобы корни растений могли извлечь из почвы и переработать в аминокислоты достаточно значительные количества минерального азота; уже через 15 минут после внесения меченого сернокислого аммония его азот был обнаружен в корнях растений в составе аминокислот. В дальнейшем содержание меченого азота в составе аминокислот непрерывно возрастало, что свидетельствует о непрекращающемся их новом синтезе за счет внесенного в подкормку меченого азота сульфата аммония.

Синтезированные в корнях аминокислоты непрерывно отводятся в надземные органы растений. Передвижение аминокислот из корней в листья требует известного времени. В данном опыте требовалось менее 2 часов для того, чтобы можно было

обнаружить в листьях в достаточно заметных количествах меченый азот в составе аминокислот.

Образовавшиеся за счет переработки неорганического азота аминокислоты идут на синтез белка. Исследования с применением N^{15} показывают, что меченый азот может быть обнаружен в значительных количествах в составе белков уже в первые часы после внесения меченой азотной подкормки, как это видно из данных таблицы 5.

Таблица 5

Динамика включения меченого азота в азот аминокислот и белков листьев молодых растений овса

Продолжительность экспозиции растений на меченом сернокислом аммонии с 30-кратным обогащением изотопом N^{15}, час.	Обогащение изотопом N^{15} (Z)		Меченый азот, %		Обновление азота в белках, %
	аминокислоты	белки	аминокислоты	белки	
6	4,01	1,37	10,4	1,3	12,2
24	8,18	2,49	24,8	5,2	20,8
48	16,40	8,72	53,0	26,7	50,2

При вычислении процентного содержания меченого азота за 100 принималась величина обогащения изотопом N^{15} сульфата аммония, применявшегося для подкормки. Процент меченого азота во фракции аминокислот одновременно выражает степень обновления азотистого состава аминокислот, так как для их синтеза непосредственно используется внесенный в подкормку аммиачный азот сульфата аммония. Но на синтез белков используется не аммиак как таковой, а продукты его переработки, т. е. аминокислоты. Следовательно, при вычислении степени обновления белка мы должны исходить из экспериментально найденной на каждый момент степени обогащения изотопом N^{15} аминокислотной фракции азота, принимая эту величину за 100 и относя к ней экспериментально найденную величину обогащения изотопом N^{15} белковой фракции азота.

Как видно, азотистый состав белка в течение 48 часов обновился примерно наполовину, так как около 50% всех атомов азота белка за 48 часов после внесения меченого сульфата аммония были замещены новыми мечеными атомами азота.

Проводившиеся одновременно химические анализы растений показали, что общее количество азота белков как в этом, так и в других аналогичных опытах за столь короткие промежутки времени практически почти совсем не изменялось или изменялось на сравнительно незначительную величину — в пределах 5—10%. Это свидетельствует о том, что в растениях, кроме синтеза молекул белка, постоянно происходит распад уже существовавших белковых молекул. Таким образом, молекулы белка в организме растений имеют сравнительно небольшую

продолжительность жизни. Они непрерывно разрушаются и вновь воссоздаются в процессе интенсивного обмена веществ в растении.

Синтез белка и его обновление в растениях тесно связаны с процессом фотосинтеза.

При экспозиции растений в темноте, в отсутствие сахаров, нового синтеза белка и его обновления не происходит. В этих условиях происходит только непрерывный распад белка до аминокислот (табл. 6).

Таблица 6

Фотосинтез и азотный обмен растений

Время после внесения в подкормку меченого азотного удобрения $(N^{15}H_4)_2SO_4$, час.	Свет				Темнота (во время опыта) *			
	общее количество в растении, мг N		синтезировано растениями за счет меченого азота, мг N		общее количество в растении, мг N		синтезировано в растении, мг N	
	аминокислот	белка	аминокислот	белка	аминокислот	белка	аминокислот	белка
24	109	364	17,9	9,7	138	303	10,4	0
72	114	392	38,2	53,4	219	271	18,7	0
168	120	430	51,5	123,0	330	186	18,6	0

* До начала опыта растения были на свету.

В темноте меченый азот включался в сравнительно небольших количествах только в состав аминокислот, для синтеза которых наличие света не является абсолютно необходимым, содержание же меченого азота в темноте было ничтожно малым и не выходило за границы возможной ошибки эксперимента.

Прекращение синтеза белка в темноте прежде всего обусловлено тем, что в этих условиях в растениях не образуются сахара, необходимые для синтеза белка. В ряде опытов, где исходные растения характеризовались весьма высоким содержанием сахаров, в первое время их экспозиции в темноте распада белка не наблюдалось. Только после того, как первоначальные запасы сахаров в растении были истощены, начался процесс распада белка.

Опытами, проведенными в строго контролируемых условиях, установлено, что степень обеспеченности растений сахарами имеет наибольшее значение не для начальных этапов усвоения неорганического азота растениями, а для конечного этапа переработки азотистых соединений, для синтеза белка. По-видимому, синтез белка сопровождается интенсивным окислением сахара, в результате которого освобождается энергия, необходимая для активации молекул аминокислот, вступающих в реакцию синтеза белка.

Если давать растениям в нормальных условиях освещения в течение некоторого сравнительно короткого времени (36—48 часов) меченную изотопом N^{15} азотную подкормку, то большая или меньшая часть белковых молекул станет меченой, поскольку для их образования был использован меченый азот подкормки.

При последующем помещении таких растений в темноту, когда новый синтез белка прекращается и происходит только односторонний его распад до аминокислот, можно установить, подвергаются ли все белковые молекулы распаду, независимо от того, когда они образовались в растении, до или после меченой азотной подкормки, или же происходит избирательный распад каких-то определенных групп молекул белка.

Опыты, проведенные в этом направлении, показали, что сначала подвергаются распаду только «старые», т. е. те белковые молекулы, которые уже были в составе белка до внесения меченой азотной подкормки. Более же молодые белковые молекулы, синтезированные при подкормке растений меченым азотом, распадаются значительно позже (табл. 7).

Таблица 7

Избирательный распад «старых» молекул белка в темноте
(старые молекулы не мечены, молодые молекулы мечены изотопом N^{15})

Продолжительность опыта	Общее количество, мг N		Количество меченого азота, мг		Количество белка, распавшегося до аминокислот за время опыта, мг N	
	белок	аминокислоты	белок	аминокислоты	всего	в том числе меченый
Исходные растения на свету	407	117	20,7	18,8	—	—
36 час. в темноте	328	233	21,9	19,0	81	—
72 час. в темноте	243	290	20,6	19,7	164	—
108 час. в темноте	122	430	13,4	27,2	285	8,5

Как следует из этих данных, в темноте непрерывно происходил распад белка до аминокислот. Однако, хотя общая масса белка падала, абсолютное количество азота в белке оставалось на исходном уровне в течение 72 часов, поэтому относительное содержание меченого азота в белке на единицу его массы возрастало.

Только при экспозиции в темноте в течение 108 часов абсолютное количество меченого азота в белке резко упало.

Из данных таблицы 5 следует, что в первые 72 часа пребывания растений в темноте распадались только «старые» молекулы белка, образовавшиеся не ранее как 96 часов назад, т. е. в то время, когда растениям еще не была дана азотная меченая подкормка.

Более молодые меченые молекулы белка, образовавшиеся после внесения азотной подкормки с N^{15}, начинают распадаться только после 72 часов пребывания их в темноте.

Таким образом, обновление белка происходит в результате селективного распада старых его молекул и нового их синтеза. Продолжительность жизни белковой молекулы в молодых растениях, по данным этого и подобных опытов, близка к 90—120 часам.

Во многих физиологических опытах по сравнительному изучению поступления в растения нитратного и аммонийного азота при использовании обычных аналитических методов, как правило, отмечалось более интенсивное поступление аммонийного азота, и отсюда делалось заключение, что аммонийный азот быстрее, чем нитратный, используется в растениях на синтез белка. Однако правильность такого заключения могла бы быть установлена только при использовании изотопного метода, позволяющего получить точные данные о скорости включения меченого азота в состав аминокислот и белка растений.

В действительности оказалось, что нитратный азот медленнее используется на синтез аминокислот, чем аммонийный азот. Это находит свое объяснение в том, что нитраты, прежде чем пойти на синтез аминокислот, должны предварительно подвергнуться восстановлению до аммиака, что требует известного времени. Значительная часть поступивших в растения нитратов в течение некоторого, иногда сравнительно длительного, времени остается в непереработанном виде.

Несмотря на это, скорость превращения нитратного азота в аминокислоты всегда достаточна для обеспечения нормального течения процесса синтеза белка, поэтому в конечном итоге при умеренном снабжении растений азотом синтез белка происходит с одинаковой скоростью независимо от того, используется нитратный или аммонийный азот (табл. 8).

Таблица 8

Интенсивность усвоения растениями овса нитратного и аммиачного азота в опытах с применением изотопа N^{15}

Варианты опыта	Экспозиция на N^{15} 24 часа		Экспозиция на N^{15} 72 часа	
	$(N^{15}H_4)_2SO_4$	$Ca(N^{15}O_3)_2$	$(N^{15}H_4)_2SO_4$	$Ca(N^{15}O_3)_2$
Весь обнаруженный в растениях меченый азот, мг	28,14	29,15	104,1	108,53
В том числе:				
в белке	12,38	7,0	61,8	55,05
в аминокислотах	10,12	5,19	26,32	17,80
в амидах	2,32	0,32	13,36	2,03
непереработанный органический азот	3,32	16,64	5,57	52,61

Если в первое время включение N^{15} в белок при нитратном источнике азота происходит медленнее, чем при аммиачном, то уже через 72 часа включение меченого азота в белок по обеим формам азота было практически одинаковым.

Изучая интенсивность восстановления нитратов при различных условиях питания растений, мы установили, что восстановление нитратов происходит более энергично в момент их поступления в растение и неизмеримо слабее тогда, когда нитраты уже более или менее продолжительное время находились в тканях растений. Это удалось показать таким образом: растения до экспозиции их на N^{15} выращивались в водных культурах на нитратном (немеченом) источнике азота, и в этих условиях в тканях растений накапливались в значительных количествах нитраты. Затем растения переносились на питательный раствор, азот в котором был представлен меченным по N^{15} азотнокислым кальцием. Одновременно на такой же раствор переносились и растения, которым до этого давался не нитратный, а аммиачный азот.

После экспозиции на N^{15} растения снимались и поступали в анализ. Результаты опыта приведены в таблице 9.

Таблица 9

Метаболизм «новых» и «старых» нитратов в растении

Немеченый источник азота до экспозиции растений на N^{15}	Продолжительность экспозиции растений на N^{15}, час.	Содержание нитратного азота на 100 г сырого веса растения, мг	Обогащение изотопом отдельных фракций азота, выделенных из растений (Z—1)		
			NO_3	NH_3	аминокислоты
NO_3	24	80,9	1,83	1,22	0,78
NH_3	24	19,8	10,21	1,18	0,77
NO_3	72	111,2	6,12	3,29	3,02
NH_3	72	43,8	12,87	3,57	3,15
NO_3	120	64,4	7,59	4,58	4,41
NH_3	120	40,6	12,83	4,73	4,52

В растениях, предварительно выращенных на немеченом нитратном источнике азота, при последующей экспозиции на N^{15} происходило разбавление вновь поступивших меченых нитратов ранее поступившими (старыми) немечеными нитратами. В силу этого разбавления обогащение изотопом N^{15} фракции нитратного азота в этих вариантах опыта было в несколько раз ниже, чем для нитратной фракции, выделенной из растений, получавших до экспозиции на N^{15} аммонийный азот. Если бы вновь поступившие («новые») и ранее поступившие («старые») нитраты с одинаковой интенсивностью подвергались дальнейшим превращениям в растении, то продукты восстановления нитратов — аммиак и аминокислоты — имели бы соот-

ветственно и более низкое обогащение изотопом N^{15} в сравнении с вариантами, где растения получали аммонийный азот в предварительной фазе опыта. Однако фактическое обогащение изотопом N^{15} аммиака и аминокислот для одного и того же срока экспозиции было примерно одинаково в этих вариантах опыта и ни в какой мере не зависело от того, вносился или не вносился немеченый нитратный азот до экспозиции растений на N^{15}. Следовательно, в метаболизм растений прежде всего вовлекались «новые», только что поступившие нитраты.

Причина такого поведения «старых» нитратов неясна. Можно высказать только предположения, что более низкая активность «старых» нитратов может быть объяснена или недостаточной позиционной доступностью — локализацией их в таких участках клетки, которые менее доступны воздействию редуцирующих ферментов, или постепенным включением нитратов в какие-то менее реакционноспособные комплексы в тканях растений.

Выводы

1. Азот, поглощенный почвенными микроорганизмами, отчасти минерализуется и усваивается растениями непосредственно в год внесения удобрений. В последующие годы, по мере старения поглощенного микроорганизмами азота, его минерализация и доступность для растений падает, и за три года последействия растениями было использовано всего около 25% общего количества меченого азота, использованного микроорганизмами.

2. При внесении азотных удобрений, растения во всех случаях использовали почвенный азот в больших количествах, чем неудобренные растения.

3. Переработка аммиачного азота на синтез аминокислот в основном происходит в корнях, в листья поступают уже готовые аминокислоты. Использование аммиака на синтез аминокислот характеризуется весьма высокой скоростью, и уже в первые минуты после внесения меченого аммиачного азота в корнях растений можно обнаружить включение значительных количеств изотопа N^{15} в состав аминокислот.

4. Нитраты так же быстро, как и аммиак, поступают в растение, но только некоторая часть поступивших нитратов сразу восстанавливается до аммиака. Большая же часть поступивших нитратов сравнительно длительное время остается в непереработанном виде в тканях растений. При этом оказалось, что вновь поступающие нитраты подвергаются восстановлению значительно быстрее, чем «старые», ранее поступившие нитраты, которые претерпевают какие-то изменения, приводящие к снижению их метаболической активности. Несмотря на это, скорость восстановления нитратов вполне достаточна для обеспечения синтеза аминокислот на необходимом уровне.

5. Наличие в растениях активных форм углеводов является необходимым условием для синтеза в них белка. В темноте синтез аминокислот происходит, хотя и с меньшей скоростью, чем на свету, но синтез белка и его обновление вследствие недостатка сахара прекращается и происходит только односторонний распад белка до аминокислот.

Проведенные исследования установили, что в темноте в первую очередь избирательно распадаются более старые, т. е. ранее образовавшиеся белковые молекулы. Продолжительность жизни белковых молекул в темноте в опытах с молодыми растениями колебалась между 80 и 120 часами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mac Vicar R. W., Carman L., Wall R. Studies of nitrogen fertilizer utilization using N^{15} Soil. Sci. Soc. America Proc. N 15, 1950.
2. Hilbold A. E., Bartolomen W. L., Werkman C. H. The use of tracer techniques in the simultaneous measurement of mineralization and immobilization of nitrogen in soil. Soil Sei. Soc. America N 15, 1950.
3. Walker T. W., Adams A. F. R., Orchiston H. D., Faite of labeled nitrate and ammonium nitrogen when applied tograss and clover grown separately and together. Soil. Sei. N 5, 1956.
4. Турчин Ф. В., Берсенева З. Н., Корицкая И. А., Жидких Г. Г., Лобовикова Г. А. Превращение азота в почве по данным исследований с применением N^{15}.
Frans of 7-th International Congress of Soil Scence, Madison, Wisc. USA 1960.
5. Arnold P. W., Losses of nitrous oxides from soil J. Soil Sei.

ОБ АКТИВНОМ МАРГАНЦЕ В ПОЧВЕ И ЕГО ТОКСИЧНОСТИ В СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ КИСЛЫХ ФОРМ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ *

Применение сульфата аммония, аммиачной селитры и других аммиачных форм азотных удобрений вследствие их потенциальной кислотности вызывает ряд изменений в химическом составе почвы. Масштабы этих изменений и практическое их значение определяются как особенностями самой почвы, так и интенсивностью и длительностью применения кислых форм удобрений. Естественно, что на нейтральных и щелочных почвах, богатых основаниями, образовавшаяся в результате применения аммиачных удобрений кислотность полностью нейтрализуется и не оказывает влияния на рост растений. Поэтому на насыщенных основаниями почвах потенциальная кислотность удобрений не может иметь сколько-нибудь существенного значения для их практического использования в сельском хозяйстве. Это полностью подтверждается результатами многолетних опытов с формами азотных удобрений на мощном черноземе Граковского опытного

* Статья опубликована в журнале «Почвоведение» № 9, 1950.

поля Научно-исследовательского института удобрений и инсектофунгисидов, где кислые формы азотных удобрений — сульфат аммония и аммиачная селитра — при длительном, систематическом их применении ни в какой мере не уступали щелочным формам (натриевая селитра).

Совершенно иначе обстоит дело на не насыщенных основаниями подзолистых почвах. Природная кислотность этих почв во многих случаях достигает такой величины, которая уже ставит предел успешному возделыванию наиболее чувствительных к реакции среды культур — свеклы, люцерны, клевера, пшеницы. Улучшение агрономических свойств этих почв, повышение их плодородия путем известкования и введения травопольной системы земледелия является важнейшей задачей социалистического сельского хозяйства нечерноземной полосы СССР.

Естественно, что дальнейшее подкисление подзолистых почв, вызванное применением физиологически кислых удобрений, будет ухудшать условия роста растений. В исследованиях, проводившихся в связи с этим вопросом (П. Н. Кошельков, И. Г. Важенин и др.), во всех случаях при длительном применении кислых форм азотных удобрений было отмечено падение содержания в почве поглощенных кальция и магния и увеличение степени ненасыщенности почвы. Соответственно повышению кислотности в результате длительного применения физиологически кислых аммиачных удобрений происходит увеличение содержания обменного алюминия в почве.

Таблица 1

Обменная кислотность и содержание подвижного алюминия в почве при различных вариантах полевого опыта с формами азотных удобрений на 13-й год систематического применения удобрений
(подзолистая суглинистая почва ДАОС)

Варианты опыта	Обменная кислотность в мг-экв. на 100 г. почвы	Подвижный алюминий, мг на 100 г почвы (по методу А. В. Соколова)
РК без азота	0,95	4,08
РК + натриевая селитра	0,82	3,71
РК + цианамид кальция	0,42	1,87
РК + нитрат аммония	1,30	5,35
РК + сульфат аммония	2,04	9,49
РК + хлористый аммоний	1,72	7,72

Урожай в центнерах на гектар

	свекла	картофель	овес
Без удобрений	60	153	9,5
РК без азота	190	179	12,5
РК + натронная селитра	310	213	15,8
РК + цианамид кальция	240	213	14,7
РК + нитрат аммония	168	208	14,2
РК + сульфат аммония	162	201	15,2

Помещенные в таблице 1 данные дают представление о количественных масштабах в изменении величины обменной кислотности и подвижного (обменного) алюминия, происшедшем в результате длительного (12-летнего) применения различных форм азотных удобрений на подзолистом суглинке Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ.

За 12 лет опыта внесено 405 кг N, 540 кг P_2O_5, 540 кг K_2O.

Так как подвижный алюминий оказывает вредное влияние на рост растений, что в свое время было установлено работами ряда исследователей, то можно было считать, что резкое повышение содержания обменного алюминия в почве является одной из основных причин отрицательного последействия кислых аммиачных форм азотных удобрений.

Но в подзолистых почвах наряду с алюминием имеется в большем или меньшем количестве и обменноспособный марганец. Можно было бы поэтому предполагать, что под влиянием длительного применения кислых аммиачных удобрений будет повышаться и содержание обменного марганца в почве. Действительно, анализы почвы из различных вариантов полевого опыта с формами азотных удобрений на подзолистом суглинке Долгопрудной агрохимической опытной станции (ДАОС) показали, что содержание обменного марганца в почве сильно повышается в вариантах, где вносились физиологически кислые аммиачные удобрения. Эти анализы впервые проводились в 1944 г., на 13-й год систематического применения удобрений. Анализировались те же образцы, которые были использованы для определения подвижного алюминия и обменной кислотности (табл. 2).

Таблица 2

Содержание подвижного (обменного) марганца в подзолистой суглинистой почве ДАОС по различным вариантам полевого опыта с формами азотных удобрений на 13-й год систематического применения удобрений

Варианты опыта	Обменный марганец в мг на 100 г почвы
РК без азота	2,78
РК + натриевая селитра	2,62
РК + цианамид кальция	1,84
РК + нитрат аммония	4,02
РК + сульфат аммония	8,60
РК + хлористый аммоний	6,90

По всем кислым формам азотных удобрений содержание обменного марганца в почве выражалось примерно в таких же

абсолютных величинах, как и содержание подвижного алюминия, хотя по фону РК и щелочным формам азотных удобрений марганца было меньше, чем алюминия. Резкое возрастание подвижного марганца в почве при длительном внесении аммиачных удобрений было констатировано и в других опытах (табл. 3).

Таблица 3

Содержание обменного марганца в мг на 100 г почвы в образцах, взятых из многолетних опытов с формами азотных удобрений
(подзолистый суглинок ДАОС, 1945 г.)

Растение	Фон РК без азота	Сульфат аммония	Натриевая селитра
Свекла, севооборот № 30	2,4	10,1	3,9
Озимая рожь, севооборот № 30	1,17	6,90	2,62
Свекла, севооборот № 27	4,0	6,50	4,25

Обменный марганец сравнительно легко проникает в растение. В таблице 4 приведены результаты определения марганца в образцах растений, взятых на отдельных делянках опытов с формами азотных удобрений.

Таблица 4

Содержание марганца в мг на 100 г сухого вещества растений по отдельным вариантам опытов с формами азотных удобрений на подзолистой суглинистой почве ДАОС

Растения	Фон РК без азота	Сульфат аммония	Натриевая селитра
Овес, все растение (1944 г.)	9,61	34,06	8,33
Свекла, листья (1944 г.)	65,4	182,0	42,1
Свекла, листья (1945 г.)	22,0	327,0	15,2
Рожь, все растение (1945 г.)	26,0	32,0	23,0
Клевер (1945 г.)	17,0	38,0	12,0
Тимофеевка (1945 г.)	Следы	16,0	Следы

Содержание марганца в растениях по сульфату аммония в несколько раз выше, чем по фону без азота или по натриевой селитре. Интересно то, что в свекле — растении, характеризующемся чрезвычайно высокой чувствительностью к подкислению почвы, содержание марганца в варианте с сульфатом аммония было в 5—10 раз больше, чем в других растениях.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ УРОЖАЕМ И ИХ ПРЕВРАЩЕНИЕ В ПОЧВЕ*

Применение азотных удобрений в ряде районов нашей страны часто является решающим фактором в получении высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

Урожайность таких культур, как хлопчатник, сахарная свекла, чай и другие технические культуры, в результате снабжения их минеральными, в том числе и азотными, удобрениями в последние годы резко возросла. Достаточно сказать, что еще в начале тридцатых годов, когда минеральные удобрения у нас почти не применялись, урожай хлопка-сырца в Средней Азии не превышал 7—8 ц/га. В настоящее же время урожай хлопка-сырца составляет в среднем около 23 ц/га, а во многих колхозах и совхозах он достигает 35—40 ц/га.

Получение высоких урожаев хлопка в условиях орошаемых районов Средней Азии в основном обязано интенсивному использованию азотных удобрений. В соответствии с данными многочисленных опытов, проведенных в Средней Азии, можно считать, что каждый килограмм внесенного под хлопчатник азота окупается в зависимости от состояния агротехники 10—15 кг хлопка-сырца.

В Черноземной лесостепной зоне, где расположены основные массивы сахарной свеклы, внесение средних доз азотных удобрений (60—80 кг/га) повышает урожай сахарной свеклы на 50—70 ц/га, а внесение даже небольших доз азота — 30 кг/га под зерновые повышает их урожай на 4—5 ц.

Но особенно высокой потребностью в азоте характеризуются районы нечерноземной зоны, занимающей в пределах европейской части Союза огромную территорию, включающую около 40 млн. га посевов различных сельскохозяйственных культур. Наличие достаточного количества влаги в этой зоне создает весьма благоприятные условия для эффективного использования азотных удобрений. Прибавки урожая от внесения азотных удобрений выражаются здесь весьма высокими величинами для всех сельскохозяйственных культур — льна, картофеля, овощей, зерновых и кормовых. Применение возрастающих доз азотных удобрений в этой зоне неизменно сопровождается одновременным возрастанием урожайности. Это хорошо видно из следующих данных многолетних опытов, заложенных С. В. Щерба на подзолистой суглинистой почве Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ (табл. 1).

---

* Статья опубликована в Журнале Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева, т. X, № 4, 1965.

Таблица 1

Доза азота (кг/га) на фоне РК	Урожай яровой пшеницы, ц/га	
	без навоза	по навозу
Без азота	11,4	16,1
30	19,4	25,3
45	26,5	30,9
60	28,6	34,4
75	36,0	37,6

Весьма резко выражена потребность в азоте и в субтропических районах Закавказья, где урожай таких культур, как чай, цитрусовые и другие, полностью зависит от размеров снабжения их азотными удобрениями. И только в степных районах нашей страны, где сами почвы богаче азотом и где влага часто в минимуме, применение азотных удобрений обычно не сопровождается достаточно значительными эффектами. Получение хороших урожаев в этих районах достигается прежде всего мероприятиями по накоплению и сохранению влаги в почве, а из отдельных удобрений главная роль здесь должна быть отведена фосфатам, в особенности таким приемам их рационального применения, как внесение небольших доз гранулированного суперфосфата в рядки. Конечно, и здесь могут иметь место случаи эффективного использования азотных удобрений, но это существенно не меняет общего положения.

Таким образом, за исключением сухих степных районов во всех остальных зонах Советского Союза, т. е. на большей части его территории, применение азотных удобрений дает резкое повышение урожайности. Развитие азотной промышленности в нашей стране позволило уже в настоящее время практически полностью обеспечить потребность в азотных удобрениях хлопчатника, сахарной свеклы и других технических культур, возделываемых на огромных площадях, и приступить к снабжению азотными удобрениями продовольственных и кормовых культур в районах с наиболее высокой потребностью в азоте. Но основные зерновые культуры в настоящее время получают мало азотных удобрений, поэтому средний урожай зерновых у нас ниже, чем в тех странах Европы, где азотные удобрения в значительных количествах применяются и под зерновые культуры.

Точные опыты, проведенные различными исследовательскими институтами и сельскохозяйственными опытными станциями, так же как и практика ряда колхозов и совхозов, показывают, что при использовании обычно принятых в практике доз минеральных удобрений, в том числе и азотных, под зерновые культуры средние урожаи их (пшеницы, ржи, овса) за ряд лет в нечерноземной зоне и во влажной части черноземной

зоны составляют около 25—30 ц зерна, т. е. не ниже, чем в других европейских странах, широко применяющих минеральные удобрения под зерновые культуры.

Огромная роль азотных удобрений в повышении урожайности и в конечном счете в повышении продуктивности земледелия обусловливает необходимость дальнейшего расширения их производства в СССР. По произведенным расчетам, для обеспечения основных сельскохозяйственных культур нашей страны азотными удобрениями потребуется примерно 6,0 млн. т азота.

Однако в этих расчетах в качестве исходных величин принимались умеренные нормы внесения минеральных удобрений на единицу площади для большинства сельскохозяйственных культур и прежде всего для зерновых культур, а также сравнительно ограниченное использование азотных удобрений для естественных лугов и пастбищ. Но в последнее время в мировой практике применения удобрений под зерновые культуры и на лугопастбищных угодьях происходят значительные изменения. Если до недавнего времени считалось нецелесообразным применение высоких доз азота под зерновые культуры из-за связанного с этим полегания зерновых, то теперь во многих западноевропейских странах созданы новые неполегающие высокопродуктивные сорта зерновых, которые при внесении около 150 кг азота на гектар дают урожай зерна 60—70 ц и больше.

В нашей стране также имеется такой высокопродуктивный сорт озимой пшеницы, как Безостая 1, которая не полегает и при использовании высоких доз азота дает урожай зерна 50—70 ц/га. Для создания такого урожая даже на весьма богатом кубанском черноземе необходимо вносить азотные удобрения.

Можно надеяться, что недалеко то время, когда наши генетики и селекционеры создадут и для этих районов высокопродуктивные, неполегающие сорта озимой пшеницы и других зерновых. А это значит, что только на площади в 50 млн. га, занятой под посевами зерновых во влажных густонаселенных районах, при использовании достаточных количеств азота ежегодный сбор зерна составит около 15—18 млрд. пудов, что с избытком покроет потребность в зерне нашей страны.

В ряде стран Западной Европы уже теперь применяют высокие дозы азота на лугах и пастбищах, и это является основным фактором, обеспечивающим создание мощной кормовой базы для интенсивного развития животноводства. В этих странах считают, что использование на лугах 1 т азота обеспечивает содержание 5 коров при средней удойности в 5 тыс. л молока в год от одной коровы, а при мясном направлении животноводства 1 т азота, использованного на лугах, дает 1,5 т мяса.

Близкие к этим цифрам данные были получены и в производственных опытах в нашей стране.

В настоящее время в таких странах, как Голландия, Бельгия, на гектар лугов вносится в среднем 120—150 кг азота. Но уже в опытах и в отдельных хозяйствах вносят 300 кг азота на гектар луговых угодий, и продуктивность их возрастает в прямой пропорции к количеству внесенного азота.

Во влажных районах СССР естественные луга и пастбища занимают большие площади, на которых применение минеральных и особенно азотных удобрений приведет к значительному снижению себестоимости продуктов животноводства. Таким образом, следует ожидать, что в ближайшей перспективе использование высоких доз азота для удобрения зерновых культур и лугов потребует дальнейшего роста производства азотных удобрений.

Условия азотного питания оказывают значительное влияние на качество продукции сельскохозяйственных растений. Обычно содержание белка в зерне пшеницы, ржи и других злаков, возделываемых на почвах, обеспеченных азотом, при равенстве прочих условий на 25—30% выше, чем на менее обеспеченных азотом почвах.

Массовые анализы зерна пшеницы, овса, ржи на полях Долгопрудной агрохимической опытной станции (дерново-подзолистая суглинистая почва) показали, что на участках, где применялись обычные дозы азота (45—60 кг/га), содержание белка в зерне варьировало для отдельных культур в пределах 12,5—16%, а на участках, не удобренных азотом, — всего 9—10%.

Столь же значительное влияние оказывало внесение азотных удобрений и на содержание белка в кормовых растениях.

Достаточное снабжение пшеницы азотом имеет большое значение для образования клейковины, по содержанию которой производится оценка хлебопекарных качеств пшеницы. Работы в этом направлении показали, что пшеница с удобренных азотом вариантов многолетнего полевого опыта на Долгопрудной агрохимической опытной станции в среднем была в полтора раза богаче клейковиной в сравнении с вариантами, где азотные удобрения не вносились. Так, при содержании сухого вещества клейковины в зерне по фону РК (без азота) 9,3% содержание ее при внесении различных форм азотных удобрений колебалось от 12,5 до 15,5%. Форма соединения азота в применяемом удобрении влияет на соотношение отдельных индивидуальных белков в общем белковом комплексе растений и тем самым на аминокислотный состав растения. О масштабах происходящих при этом изменений в аминокислотном составе общего белкового комплекса растений можно судить по результатам следующих анализов проб пшеницы из полевого опыта на Долгопрудной агрохимической опытной станции, в котором отдельные

формы азотных удобрений вносились осенью перед посевом из расчета 30 кг азота и весной в подкормку 30 кг N на 1 га (табл. 2).

Таблица 2

Содержание триптофана и тирозина в зерне озимой пшеницы в полевых опытах на Долгопрудной агрохимической опытной станции

Условия опыта	Триптофан, %	Тирозин, %
Фон РК	0,283	0,596
Фон + кальциевая селитра	0,414	0,843
Фон + аммиачная селитра	0,334	0,720
Фон + сульфат аммония	0,284	—

Подобные результаты были получены и для яровой пшеницы в вегетационных опытах (табл. 3).

Таблица 3

Содержание триптофана, тирозина и цистина в зерне яровой пшеницы (вегетационные опыты) *

Форма азотного удобрения	Триптофан, %	Тирозин, %	Цистин, %
Кальциевая селитра	0,430	0,631	0,05
Аммиачная селитра	0,377	0,609	0,13
Сульфат аммония	0,313	0,442	0,25

* Опыты проведены И. А. Козициной.

Таким образом, изменяя условия азотного питания, мы можем в известной степени регулировать аминокислотный состав растительных белков. Это имеет большое значение, так как физиологическая полноценность белка определяется прежде всего содержанием в нем отдельных, так называемых незаменимых аминокислот, которые не могут синтезироваться животным организмом.

К таким именно незаменимым аминокислотам относится и триптофан, при низком содержании которого в кормах и продуктах питания людей наступают серьезные нарушения в обмене веществ в организме животных и человека. Возможно, что высокие пищевые качества пшеницы, возделываемой в юго-восточных районах нашей страны, где, как известно, в почве накапливаются в больших количествах нитраты, обусловлены в зна-

чительной степени повышенным содержанием в ней триптофана. Таким образом, проблему азота в земледелии нужно рассматривать не только в аспекте повышения урожайности, но и в плане создания высококачественной полноценной продукции.

Огромное значение азотных удобрений в создании урожая обязывает применять такие приемы и методы их использования, которые могли бы обеспечить достижение возможно более высокого коэффициента полезного действия азота. Для этого мы должны располагать необходимой информацией о судьбе азотных удобрений в почве и о том, как происходит их использование в растении.

В настоящее время благодаря применению новых точных методов исследования эта область знания обогатилась весьма важными достижениями. Особенно результативным оказалось применение меченых атомов, в частности тяжелого изотопа азота N^{15}.

При внесении такого удобрения с меченым азотом можно проследить за всеми путями его превращения в почве, поступлением в растение и дальнейшим его превращением в отдельных органах и тканях растений, так как самое незначительное обогащение изотопом N^{15} совершенно точно может быть определено на масс-спектрометре.

Внесенное в почву азотное удобрение используется не только растениями, но и почвенными микроорганизмами. В конечном счете это приводит к изменению первоначальной доступности азотного удобрения растениям, а также к прямым потерям азота в результате улетучивания газообразных продуктов его превращения [1—5].

Кроме необратимых физических потерь азота, происходят потери усвояемости азота в результате биологического его поглощения почвенными микроорганизмами, которые являются конкурентами растений за обладание легкоусвояемым азотом удобрения. Поэтому в конечном итоге коэффициент использования азотного удобрения на создание урожая никогда не достигает 100%.

В рассматриваемых в настоящей работе опытах учитывался точный баланс атомов N^{15} в урожае и в почве. При учете азота в урожае анализировались надземная масса (зерно, солома, зеленая масса), а также корни, тщательно отобранные из почвы. При анализе почвы средняя проба последовательно обрабатывалась 0,5 н. K_2SO_4 до полного удаления нитратов и поглощенного аммония. Из полученной таким путем вытяжки сначала отгонялся аммонийный азот, а затем добавлялся сплав Деварда для восстановления нитратного азота и производился отгон аммиака, образовавшегося из нитратов.

Остаток после отгона аммиака со сплавом Деварда сжигался по Кьельдалю для определения перешедшего в солевую вытяжку из почвы растворимого органического азота. Почва после обра-

ботки ее раствором K_2SO_4 высушивалась и аликвотная ее часть сжигалась по Кьельдалю с последующим отгоном аммиака и улавливанием его, как обычно, титрованным раствором H_2SO_4. Пробы растения ввиду возможного наличия в них нитратного азота сжигались с фенолсерной кислотой. Определение содержания изотопа N^{15} в исследуемых пробах производилось на масс-спектрометре МИ 13-01 после предварительного окисления аммонийного азота гипобромитом натрия до элементарного азота в вакуумной установке *.

В таблице 4 приведены результаты вегетационных опытов с овсом на пяти разных почвах.

Таблица 4

Баланс N^{15} в вегетационных опытах * с овсом с применением меченого $(NH_4)_2SO_4$, доза 0,45 г N на сосуд, атом% избытка N^{15} = 10,3

Почва	N^{15} в урожае растений и почве, % от исходной дозы при закладке опыта		Потери азота, %
	азот урожая	азот органической фракции почвы	
Дерново-подзолистая суглинистая	64	21	15
Известкованная подзолистая	68	20	12
Мощный чернозем	66	17	17
Карбонатный серозем	72	17	11
Краснозем	68	15	17

* Усвояемый азот (NO_3, NH_3) в конце опыта не был обнаружен в почве вследствие полного использования растениями.

Наличие меченого азота в составе органического вещества почвы может быть объяснено только использованием внесенного меченого азотного удобрения почвенными микроорганизмами на построение их тел. Некоторое количество аммонийного азота необменно фиксируется почвой, но величина этой фиксации для изучавшихся нами почв крайне незначительна и составляла обычно 0,3—0,5% от исходной дозы азота.

Степень использования азота почвенными микроорганизмами и размеры его потерь возрастают, когда почва остается под паром и когда, следовательно, внесенное удобрение полностью остается в распоряжении почвенных микроорганизмов.

Кроме того, оказалось, что существенное значение имеет также и форма азотного удобрения. При внесении меченого аммонийного азота наблюдаются значительно меньшие потери,

* В проведении исследований, кроме автора, принимали участие сотрудники лаборатории азота: З. Н. Берсенева, И. А. Корицкая, Г. Г. Жидких, Г. А. Лобовикова.

чем при внесении нитратных удобрений, а доля азота, используемого на построение тел почвенных микроорганизмов, наоборот, была большей при применении аммонийного источника азота (табл. 5).

Таблица 5

Баланс N^{15} в вегетационном опыте при внесении меченых сернокислого аммония и азотнокислого кальция

Обогащение изотопом N^{15}: для сернокислого аммония — 11,61 атом% избытка N^{15}; для азотнокислого кальция — 6,82 атом% избытка N^{15}. Доза азота — 0,5 г на сосуд с 4 кг почвы

Почва	Форма азота	N^{15} в почве и в растении, % к исходному его количеству при закладке опыта				Потери N^{15}, %
		растение (надземная масса + + корни)	усвояемый азот ($NO_3 + NH_3$)	органический азот почвы (азот, поглощенный микроорганизмами)	сумма найденного N^{15}	
I. Опыт с овсом						
Известкованный подзолистый суглинок	$(N^{15}H_4)_2SO_4$	68,4	7,4	8,9	84,7	15,3
То же	$Ca(N^{15}O_3)_2$	51,4	19,6	4,8	75,8	24,2
Мощный чернозем	$(N^{15}H_4)_2SO_4$	59,4	9,1	11,4	80,0	20,0
То же	$Ca(N^{15}O_3)_2$	43,2	21,7	5,9	70,8	29,2
II. Почва под чистым паром						
Известкованный подзолистый суглинок	$(N^{15}H_4)_2SO_4$	—	55	22,6	77,6	22,4
То же	$Ca(N^{15}O_3)_2$	—	62	7,2	69,2	30,8
Мощный чернозем	$(N^{15}H_4)_2SO_4$	—	53	21,4	74,4	25,6
То же	$Ca(N^{15}O_3)_2$	—	57	6,6	63,6	36,5

Таким образом, коэффициент использования азота из внесенного меченого азотного удобрения для всех почв в этом опыте был близок к 65—70%, потери азота составляли в среднем около 15%, а доля азота, перешедшая в органическое вещество почвы, 11—17%.

Различие в поведении в почве нитратных и аммонийных удобрений можно объяснить следующими причинами.

1. Если потери азота происходят главным образом в результате денитрификации, то следует предположить, что нитратные удобрения сразу же после их внесения в почву подвергаются атаке денитрифицирующих бактерий, в то время как аммиачный азот может включаться в сферу деятельности этих бактерий только после его нитрификации, т. е. значительно позже. Не исключено также, что нитрифицирующие организмы, атакующие

аммиачный азот, являются антагонистами денитрификаторов и в той или иной мере подавляют их активность.

2. Нитрифицирующие бактерии, являясь автотрофными организмами, используют энергию, выделяющуюся при окислении аммиака, для синтеза органического вещества за счет CO_2 и азота аммиака.

Разумеется, большая часть ассимилированного бактериями углерода расходуется в процессе их жизнедеятельности. Но некоторое количество фиксированного углерода используется на создание новых бактериальных клеток.

Таким образом, при применении аммиачных форм азотных удобрений должно происходить некоторое пополнение ресурсов органического вещества в почве за счет усвоения CO_2 нитрифицирующими бактериями. Правда, количественные масштабы такого пополнения весьма скромны.

Использование нитратного азота на построение тел микроорганизмов возможно лишь при наличии в почве источника усвояемых микроорганизмами форм углерода (органического вещества). Сравнительно слабая доступность микроорганизмам основного фонда органического вещества почвы ограничивает на определенном уровне размеры биологического поглощения нитратного азота. Это соответствует данным, полученным в наших исследованиях, в которых процент меченого нитратного азота, трансформировавшегося в органическую фракцию почвенного азота, был незначителен даже при длительном пребывании почвы под чистым паром. Но при внесении избытка органического неразложившегося материала, например соломы или недостаточно разложившегося соломистого навоза, происходит усиленное поглощение микроорганизмами как нитратного, так и аммиачного азота.

При внесении в почву меченого азота он разбавляется содержащимся в самой почве усвояемым азотом неорганических соединений, образовавшихся в результате минерализации почвенного гумуса, и поступает в растение на равных с ним основаниях. Поэтому удельное обогащение азота урожая изотопом N^{15}, которое, естественно, всегда будет значительно ниже, чем удельное обогащение изотопом N^{15}, взятого для опыта исходного меченого удобрения, может служить для достаточно точного определения количества содержащегося в почве усвояемого азота. Последнее может быть вычислено по следующей формуле:

$$A = \frac{K_у \cdot Д}{K_р},$$

где А — общий запас усвояемого азота (в мг, г, кг), включая азот внесенных удобрений и усвояемый азот почвы;

Д — доза внесенного меченого удобрения;

$K_у$ — атом% избытка N^{15} в удобрении;

$K_р$ — атом% избытка N^{15} в урожае растений.

Разница А—Д показывает запас усвояемого почвенного азота (П).

Запас собственного усвояемого азота в почве полностью создается уже к концу первого месяца после посева растений. Это видно из следующего опыта, в котором растения убирались и анализировались в различные фазы их развития (табл. 6).

Таблица 6

Запас усвояемого азота в известкованной дерново-подзолистой почве, вычисленный по данным анализа растений (яровая пшеница) в различные стадии развития (вегетационный опыт)

Срок уборки урожая	Сухой вес растений, в г	Исходное меченое удобрение Ca $(N^{15}O_3)_2$, атом% избытка $N^{15} = 10{,}05$			
		общий азот урожая, мг	доза азота = 0,25 г		
			атом% избытка N^{15} в урожае	запас усвояемого азота в мг N на сосуд	
				общий (А)	собственно почвенный (П)
Стадия кущения	1,43	74	6,35	400	150
Стадия колошения	19,45	298	6,65	382	132
Стадия конец цветения	19,10	257	6,24	406	156
Стадия полного созревания	30,50	306	6,24	406	156

Как следует из этих данных, величина запаса усвояемого азота в почве, вычисленная по данным анализа растений, убранных в различные сроки, была довольно постоянной, близкой к 400 мг на сосуд для общего запаса усвояемого азота и соответственно около 150 мг для усвояемого почвенного азота. Из этого можно сделать заключение, что образование в почве новых количеств усвояемого азота за счет минерализации органического азота в период стадии кущения до полного созревания растений, практически не имело места. В то же время растения уже к периоду колошения полностью использовали весь наличный запас усвояемого азота. И так как вынос азота урожаем составлял только $^3/_4$ от исходного запаса в почве, то, следовательно, $^1/_4$ усвояемого азота пошла на связывание азота микроорганизмами и на потери его из почвы.

Таким образом, все те изменения, которые претерпевает в почве азот меченого удобрения, в равной степени распространяются и на усвояемый собственный азот почвы. Следовательно, степень использования усвояемого почвенного азота растениями, размеры его потерь и поглощение микроорганизмами будут выражаться в тех же относительных величинах, что и для внесенного меченого усвояемого азота. Годовой запас усвояемого азота в почвах в зависимости от метеорологических условий и ряда

других факторов колеблется чаще всего в пределах 2—3% от общего количества азота, аккумулированного в органическом веществе почвенного гумуса.

Если потери усвояемого азота почвы по данным с применением изотопа N^{15} близки в среднем к 15%, то по отношению к общему азоту почвы эти потери выражаются в 0,3—0,5%.

Приведенные выше данные о превращении усвояемого азота в почве получены в замкнутой системе вегетационного опыта, когда сравнительно легко можно произвести точный учет атомов N^{15} в этой системе. При работе с N^{15} в полевых условиях, в условиях естественного залегания почвы, при подведении баланса атомов N^{15} возникают известные затруднения, связанные с динамичностью подвижного усвояемого азота, представленного главным образом нитратной формой с миграцией его по почвенному профилю. Поэтому при анализе почвы необходимо отбирать представительные пробы не только в верхнем пахотном слое, но и в более глубоких слоях почвы, куда может проникнуть легкорастворимое соединение азота. Используя в полевом опыте N^{15}, мы легко можем определить степень использования усвояемого азота растениями и размеры включения его в органическое вещество, но учет потерь азота сопряжен с большими затруднениями, так как не всегда можно быть уверенным, что меченый усвояемый азот не проник в более глубокий почвенный слой.

Но если мигрировавший в более глубокие слои почвы меченый азот действительно не потерян для растений, тогда на следующий год, во всяком случае, он должен быть в соответствующей мере использован растениями. Поэтому, учитывая в полевых опытах с N^{15} поступление меченого азота в растение и наличие его в той или иной форме в почвах не только в год непосредственного внесения меченого азотного удобрения, но и в последующие годы, можно составить достаточно точное представление о судьбе меченого азотного удобрения в почве и, следовательно, о превращении собственного усвояемого азота в почве.

Такие исследования были проведены в полевых опытах на известкованной подзолистой почве Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ. В качестве меченого азотного удобрения в этих опытах использовался $(N^{15}H_4)_2SO_4$ с содержанием избытка атомов N^{15} 13,9%. Опыты проводились на небольших делянках размером 1 м², что позволило очень точно отбирать представительную среднюю пробу почвы для анализа. Азот вносился в количестве 10 г/м² (100 кг N на 1 га) и с этой дозой вносилось 1,39 г избытка атомов N^{15}.

В качестве подопытного растения в год непосредственного внесения меченого удобрения был овес, на второй год для изучения последействия меченого удобрения высевался тоже овес. Результаты опыта приведены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7

Использование растениями меченого азота $(N^{15}H_4)_2SO_4$ в полевом опыте

Растение	Урожай растений (сухой вес), г/м²	Общий азот в урожае, г	Атом% избытка N^{15}	N^{15} в урожае, мг	% использования N^{15} растениями
1-й год опыта (прямое действие)					
Зерно	308	6,325	7,05	444,5	32
Общий урожай сухого вещества, включая зерно, солому, корни	614	12,980	7,07	919,55	66,2
2-й год опыта (последействие)					
Зерно	64	1,220	0,437	5,33	0,38
Общий урожай, включая зерно, солому, корни и сорняки	238	3,985	0,565	22,54	1,62

Таблица 8

Меченый азот в почве в полевом опыте с овсом; пробы взяты после уборки урожая

Почвенный слой	Растворимый азот ($NO_3 + NH_4$)		Азот органического вещества почвы	
	мг N^{15} на 1 м²	% от внесенной дозы N^{15}	мг N^{15} на 1 м²	% от внесенной дозы N^{15}
0—20 см	12	0,86	137	10
20—40 см	5	0,36	74	5,2
Всего в слое 0—40 см	17	1,22	211	15,2

Таким образом, в первый год растениями было использовано 66% от общего количества внесенного азота; усвоение его на 2-й год было весьма низким и составляло всего около 1,6%; около 15% от внесенного азота было использовано почвенными микроорганизмами и перешло в состав органического вещества почвы, и потери азота в этом опыте составляли 15,5%.

Эти результаты близки к соответствующим данным, полученным в вегетационных опытах с применением изотопа N^{15}.

Исходя из величины обогащения изотопом N^{15} азота урожая овса в 1-й год внесения меченого удобрения, можно определить по приведенной выше формуле общий запас усвояемого азота в почве на площади в 1 га.

Этот запас в данном опыте при внесении 100 кг меченого азота с содержанием 13,9% избытка атомов N^{15} составлял 197 кг N $\left(\frac{13,9 \times 100}{7,07} = 197\right)$, в том числе усвояемый собственный азот почвы — 97 кг, фактически растениями овса в первый год было усвоено 130 кг (66,2%), перешло в органическую

форму 30 кг (15,2%) и использовано урожаем второго года 4 кг (1,9%), а общие потери внесенного меченого и почвенного усвояемого азота — 33 кг (17%).

Важно выяснить, в какой мере азот удобрения после его превращения в почве в органическую форму может служить источником питания растений как непосредственно в год внесения удобрений, так и в последующие годы.

Для изучения последействия меченого азота, перешедшего в почве в органическую форму, использовалась почва (мощный чернозем), которая предварительно компостировалась с меченым сернокислым аммонием и затем отмывалась дистиллированной водой до полного удаления нитратов и ионов аммония.

Эта почва использовалась в вегетационных опытах в качестве источника азота. Фосфаты и калий вносились в дозах 0,5 г P_2O_5 и 0,5 г K_2O на сосуд размером 15 × 20 см. Подопытным растением служил овес. Изучение последействия перешедшего в органическую форму меченого азота сульфата аммония продолжалось три года — с 1960 по 1962 г. (табл. 9).

Таблица 9

Степень использования растениями меченого азота, поглощенного почвенными микроорганизмами из внесенного в почву меченого азотного удобрения

Время, истекшее после внесения в почву $(N^{15}H_4)_2SO_4$, годы	Избыток атомов N^{15} в органическом веществе почвы, мг *	Избыток атомов N^{15}, усвоенный растениями, мг	Использование растениями N^{15}, %	Атом% избытка N^{15} для азота растений / Атом% избытка N^{15} для азота почвы
1	9,8	1,108	11,3	13,3
2	6,87	0,52	7,55	8,1
3	5,92	0,230	3,9	4,9

* Вес исходной почвы в сосуде на второй и третий год опыта был меньше, чем в первый год, вследствие ежегодного отбора проб почвы для анализа.

Из данных таблицы 9 следует, что в первый год последействия (т. е. через один год после внесения меченого сернокислого аммония в почву) минерализовалось и использовалось растениями около 11% всего меченого органического азота. В последующие годы по мере «старения» меченого органического азота интенсивность минерализации и степень его усвоения растениями непрерывно падала и составляла на третий год последействия всего около 4%.

Данные последней колонки таблицы 9, выражающие отношение удельного обогащения изотопом N^{15} азота растений к соответствующей величине для органического азота почвы, показывают, во сколько раз интенсивность минерализации меченых

частиц органического азота выше в сравнении с основным фондом почвенного азота.

Таким образом, последействие поглощенного микроорганизмами азота характеризуется в общем скромной величиной. За три года учета последействия растениями было усвоено всего около 25% общего количества поглощенного микроорганизмами меченого азота.

Применение изотопа N^{15} позволило установить еще одну весьма важную особенность во взаимодействии азотных удобрений с почвой. Оказалось, что внесение азотных удобрений на всех почвах вызывает значительное увеличение степени использования растениями природного азота почвы.

Так, в опытах 1963 г. при предпосевном внесении меченых азотных удобрений были получены следующие результаты (табл. 10).

Таблица 10

Использование яровой пшеницей азота меченных по N^{15} удобрений и почвенного азота в вегетационных опытах на известкованной дерново-подзолистой почве Долгопрудной агрохимической опытной станции

Удобрения	Общий вынос азота урожаем, мг	N^{15} в урожае, мг	Использование растениями азота из меченых удобрений		Использование растениями почвенного азота, мг
			%	мг	
Фон РК (без азота)	132	—	—	—	132
Фон РК + 0,5 г N в сернокислом аммонии — 9,71 атом% избытка N^{15}	524	31,36	64,5	322	202
Фон РК + 0,5 г N в кальциевой селитре — 5,05 атом% избытка N^{15}	511	17,265	68,6	342	169

При дальнейшем изучении этого вопроса оказалось, что размеры использования почвенного азота резко возрастают при внесении меченых азотных удобрений в позднюю подкормку (табл. 11).

Цифры последней колонки таблицы получены путем вычитания выноса азота урожаем контрольного варианта (фон РК) из количества азота, усвоенного растениями из почвы при внесении удобрений. Это, если можно так выразиться, «добавочный азот», усвоенный растениями за счет таких его источников, которые не могли быть использованы без внесения удобрений. Чрезвычайно интересно то, что размеры использования этого «добавочного» азота наиболее значительны при более позднем внесении удобрений, когда количество его было в 1,75 раза больше, чем весь вынос азота урожаем в контрольном варианте. При внесении азотных удобрений в более ранний срок — в кущение — количество усвоенного растениями «добавочного» азота

Таблица 11

Использование яровой пшеницей меченого азота удобрений и азота почвы при внесении удобрений в различные фазы развития растений

Доза азота — 0,5 г на сосуд; атом% избытка N^{15} для сернокислого аммония — 9,71, для азотнокислого кальция — 5,05. Почва — окультуренный дерново-подзолистый суглинок (1963 г.)

Форма азотного удобрения	Сроки внесения азота	Урожай зерна, г	Азот в зерне, %	Общий вынос азота урожаем (зерно, солома, корни), мг	N^{15} в урожае, мг	Использование азота урожаем, мг		Мобилизация почвенного азота при внесении азотных удобрений, мг
						из меченого удобрения	из почвы	
Фон РК		13,60	1,605	279	—	—	279	—
$(N^{15}H_4)_2SO_4$	Кущение	18,40	2,780	670	29,06	300	370	91
То же	Колошение	22,15	3,370	887	39,10	403	484	205
„	Налив	21,80	3,556	876	41,00	421	455	176
$Ca(N^{15}O_3)_2$	Кущение	18,42	3,166	727	17,80	352	375	96
То же	Налив	20,10	3,251	794	16,02	318	476	197

было примерно в 2 раза меньше. При этом форма удобрения при внесении его в подкормку не оказывала влияния на величину использования растениями «добавочного» азота. Как по сернокислому аммонию, так и по азотнокислому кальцию в этом случае были получены одинаковые показания.

Примерно такие же результаты были получены в опыте, проведенном в 1962 г. с яровой пшеницей, для которой была взята более бедная почва (табл. 12).

Таблица 12

Использование яровой пшеницей меченого азота сернокислого аммония при внесении его в различные фазы развития растений в вегетационных опытах на известкованной дерново-подзолистой почве

Доза азота — 0,5 г; атом% избытка N^{15} — 11,8; доза N^{15} — 59 мг на сосуд (1962 г.)

Сроки внесения азота	Урожай зерна, г	Азот в зерне, %	Общий вынос азота урожаем (зерно, солома, корни), мг	N^{15} в урожае, мг	Использование азота урожаем, мг		„Добавочный" азот, мг N
					из меченого удобрения	из почвы	
Перед посевом	17,7	1,84	487	34,75	294	193	48
Кущение	11,6	2,39	475	37,57	319	156	11
Колошение	8,4	3,26	657	42,01	358	299	154
Налив	9,4	3,37	633	38,00	322	311	166
Контроль без азота (фон РК)	4,1	2,22	145	—	—	145	—

Так же как и в предыдущем опыте, внесение азотного удобрения в поздние фазы развития пшеницы приводило к исполь-

зованию растениями больших количеств «добавочного» азота из окружающей среды.

Возникает вопрос: из каких источников растения используют этот «добавочный» азот? Растения в контрольных вариантах (без азота) полностью используют запасы усвояемого азота, которые уже были в почве перед посевом и которые могли образоваться при мобилизации органического почвенного азота во время вегетации растений. Но если даже допустить, что в контрольных вариантах растения вследствие резкого недостатка азота не могли полностью использовать усвояемый азот (хотя это и не соответствует данным анализов почвы после уборки урожая), то казалось бы, что наиболее энергично должны были бы использовать почвенный азот растения в том случае, когда азотные удобрения вносились до посева, т. е. тогда, когда условия для роста растений были наиболее благоприятны. Однако в действительности, как это следует из приведенных здесь данных, максимальное количество почвенного «добавочного» азота усвоили растения при внесении азотных удобрений в период колошения или налива, несмотря на то что растения в этих вариантах развивались значительно хуже.

Кроме того, в этих вариантах, например при внесении азотного удобрения в фазе налива до момента внесения азотного удобрения, растения могли использовать почвенный азот во всяком случае не в бóльших количествах, чем вынос его урожаем в контрольном варианте. Следовательно, за сравнительно короткий промежуток времени, от начала налива до полного созревания, растения использовали в 3 раза больше «добавочного» почвенного азота, чем в том варианте, где азот вносился до посева. Не меньшее удивление вызывают и слишком большие размеры усвоения растениями почвенного азота в этих вариантах.

Фактически вынос почвенного азота при внесении азотных удобрений увеличился примерно в 2 раза в сравнении с соответствующей величиной для контрольных вариантов. Нам представляется, что в поставку растениям этого «добавочного» азота может какими-то путями включаться и атмосферный азот.

В злаковых растениях присутствуют ферментные системы, которые, будучи выделены соответствующими приемами из растений, могут в искусственных условиях катализировать фиксацию атмосферного азота. В живых растениях эти ферментные системы находятся в малоактивном состоянии. Не исключена возможность, что при резком усилении азотного питания в поздние стадии развития растений нарушается обмен их веществ, в результате чего происходит активирование ферментных азотфиксирующих систем и растения приобретают способность фиксации атмосферного азота.

Эти соображения, разумеется, требуют экспериментальных доказательств, но пока что трудно дать какое-либо другое правдоподобное объяснение установленным в этих опытах фактам

резкого усиления использования растениями «добавочного» азота при поздних сроках внесения азотных удобрений.

Из всех рассмотренных опытов следует сделать еще и тот вывод, что применение азотных удобрений, несмотря на то что они не полностью используются растениями, приводит одновременно к более интенсивному использованию растениями почвенного азота и, возможно, отчасти к использованию ими атмосферного азота, и это в значительной мере компенсирует происходящие в почве потери азота из удобрений.

Необходимо указать и на некоторые другие положения, которые представляют практический интерес. Это прежде всего возможность резкого повышения процента азота или белка в зерне при внесении азотных удобрений в более поздние сроки. По-видимому, это связано с тем, что при обычно применяемых дозах удобрений при внесении их до посева ко времени образования зерна запасы усвояемого азота в почве истощаются и формирование азотистого состава зерна происходит только за счет реутилизации ранее усвоенного растением азота.

При внесении же азотных удобрений в поздние сроки, когда происходит усиленный отток азота к генеративным органам, последние будут более обильно снабжаться не только за счет азота вновь внесенного удобрения, но и за счет мобилизации «добавочного» азота.

Обычно считается, что поступление азота в зерновые колосовые злаки (пшеница, рожь и др.) заканчивается до колошения. Однако если это и имеет место, то только потому, что к этому времени запасы усвояемого азота в почве практически полностью исчерпываются растениями. Но при снабжении растений азотом они могут и в поздние стадии их развития интенсивно использовать азот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mc. Vicar R. W., Carman L., Wall R. Soil Sci. Soc. America Proc. N 15, 205 (1950).
2. Hilbold A. E., Bartolomew W. L., Werbman C. H. ibid. N 15, 166 (1950).
3. Walker T. W., Adams A. F. R., Orchiston H. D. Soil Sci. 81, 339 (1956).
4. Турчин Ф. В., Берсенева З. Н., Корицкая И. А., Жидких Г. Г., Лобовикова Г. А. Trans of 7-th International Congress of Soil Sci. Madison, Wisc. USA, 1960.
5. Arnold P. W. Soil J. Soil Sci. 77, 166 (1954).
6. Турчин Ф. В., Берсенева З. Н., Жидких Г. Г., ДАН СССР, № 3 (1963).

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

РОЛЬ МИНЕРАЛЬНОГО И БИОЛОГИЧЕСКОГО АЗОТА В ЗЕМЛЕДЕЛИИ СССР *

Проблема азота в земледелии, в научной разработке которой большую роль сыграл основоположник советской агрономической химии Д. Н. Прянишников [5], является одной из важнейших проблем агрономической науки. Совершенно очевидно, что наличные ресурсы усвояемого для растений азота в земледелии в связи с ролью этого элемента в синтезе белка являются одним из определяющих факторов в создании урожая.

Важнейшим источником азота в питании растений прежде всего является сама почва.

Обеспеченность растений почвенным азотом в конкретных условиях различных почвенно-климатических зон, как известно, неодинакова. Грубо говоря, в этом отношении наблюдается известная тенденция к возрастанию ресурсов почвенного азота в направлении от более бедных почв подзолистой зоны к относительно обеспеченным азотом мощным и обыкновенным черноземам.

Крайне бедны азотом легкие песчаные и супесчаные почвы, занимающие около $^1/_3$ пахотных земель в пределах нечерноземной полосы.

Органический азот почвы становится доступным растениям только после его минерализации — процесса, осуществляемого почвенными микроорганизмами, использующими органическое вещество почвы в качестве источника энергии. Интенсивность минерализации органического азота зависит как от природы самого органического вещества, так и от физико-химических свойств почвы, условий влажности, температуры, аэрации и т. п.

Что касается химической природы органического азота почвы, то в этом отношении наши знания остаются пока еще недостаточно полными. Несомненно, однако, что значительная часть органического азота почвы при кислотном ее гидролизе расщепляется до аминокислот. На этом основании в свое время были высказаны предположения о белковой природе органического азота почвы (Сузуки [14], Шмук [10], Ваксман [2]). Значительная устойчивость органического азота почвы к гидролити-

---

* Статья опубликована в журнале «Почвоведение» № 6, 1956.

ческому воздействию микроорганизмов при этом объяснялась наличием прочной связи белка с лигнином, дубильными веществами, почвенными минералами и т. п.

В более поздних представлениях, развитых И. В. Тюриным [8—9], С. С. Драгуновым [3], Т. М. Кононовой [4] и др., органический азот почвы представлен не белками как таковыми, а специфическими веществами — продуктами конденсации аминокислот, образующимися при автолизе белка плазмы отмерших микроорганизмов с углеводами, уроновыми кислотами, гуминовыми кислотами.

В последние годы в нашей лаборатории был разработан количественный метод хроматографического определения аминокислот из почвенных гидролизатов. Этот метод вкратце сводится к следующему: навеска почвы в 20—30 г подвергается 24-часовому гидролизу с шестинормальной серной кислотой при слабом кипячении. Полученный гидролизат освобождается от избытка серной кислоты путем осаждения ее в виде $BaSO_4$ при добавлении BaOH. Затем гидролизат пропускается через колонку, наполненную Н-катионом (ионообменные синтетические смолы типа эспатита, вофатита и т. п.). В кислой среде аминокислоты полностью адсорбируются на катионите, а содержащиеся в гидролизатах прочие органические вещества и неорганические кислотные остатки (анионы) уходят в фильтрат — при промывании катионита дистиллированной водой. Адсорбированные на катионите аминокислоты элюируются из катионита путем многократного встряхивания последнего с CaO (1 г CaO на 10 г катионита) и 2%-ным водным раствором аммиака. Полнота извлечения аминокислот из катионита контролируется по нингидринной реакции. Полученные таким путем элюаты аминокислот выпариваются на водяной бане почти досуха, сухой остаток растворяется в точно отмеренном объеме дистиллированной воды. Из этого раствора микропипеткой отбирается проба в 0,01—0,04 мл (в зависимости от предполагаемого содержания аминокислот) для нанесения на хроматографическую бумагу. Последняя предварительно обрабатывается цитратно-фосфатным буфером с pH 7,8 (0,2-молярный раствор лимонной кислоты + 0,1-нормальный раствор Na_2HPO_4). Для хроматографического разделения аминокислот из почвенных гидролизатов в нашей лаборатории использовались два растворителя: I — водонасыщенный фенол и II — амиловый спирт + изопропиловый спирт + уксусная кислота + вода в соотношении 4 : 4 : 1 : 1. Применение этих растворителей позволяет изолировать следующие аминокислоты: цистин, аспарагиновую кислоту, глутаминовую кислоту, серин, гликокол, аспарагин, треонин, аланин, пролин, тирозин, триптофан, валин, фенилаланин, лейцин + изолейцин. Локализованные на хроматограмме аминокислоты проявляются нингидрином. Мы не останавливаемся здесь на общих приемах хроматографического анализа, достаточно полно описываемых

в соответствующих руководствах по хроматографии (Блок [1], Рачинский [6] и др.).

Для количественного определения аминокислот нами использовался метод одномерной восходящей хроматограммы. При описанной выше предварительной очистке аминокислот на катионите и при использовании пробуференной бумаги № 3 получается весьма точная локализация аминокислот и достигается полное отделение их друг от друга. После проявления хроматограммы нингидрином окрашенные участки бумаги, на которых локализованы те или иные аминокислоты, вырезаются из хроматограммы и обрабатываются верональным буфером (веронал + + HCl, pH 7); при этом окраска полностью переходит в буферный раствор и интенсивность ее измеряется на спектрофотометре или фотоколориметре. Предварительно по показаниям отсчетов обработанных таким же путем стандартных растворов аминокислот (при различной их концентрации) вычерчиваются градуировочные кривые, по которым и находят концентрацию определяемой аминокислоты в исследуемом растворе. Точность определения, по данным многочисленных проверочных анализов, составляет $\pm 5\%$ от общего содержания аминокислот в исследуемом объекте.

В таблице 1 приведены результаты определения отдельных аминокислот в гидролизатах мощного чернозема Граковского опытного поля НИУИФ, подзолистой суглинистой почвы Долгопрудной агрохимической опытной станции и той же почвы, компостировавшейся в течение двух лет с соломой и минеральным азотом.

Таблица 1

Аминокислотный состав гидролизатов органического вещества почв, белков азотобактера и соломы

Аминокислоты	% азота аминокислот к общему азоту гидролизата				
	азотобактер	солома	подзолистая почва + солома	подзолистая почва	чернозем
Аспарагиновая кислота	3,87	4,28	2,67	1,60	2,25
Глутаминовая кислота	6,03	7,00	2,57	2,60	1,32
Аланин	8,26	20,20	5,35	3,80	3,80
Гликокол	23,70	13,90	7,44	8,55	14,40
Треонин	10,70	7,50	2,88	3,62	4,05
Валин	8,10	4,65	2,32	2,72	3,90
Лейцин	2,16	4,40	0,87	0,82	1,18
Фенилаланин	1,75	1,31	0,52	0,43	0,42
Тирозин + триптофан	2,76	1,00	0,60	0,50	0,75

Для сравнения приводим также данные аминокислотного состава белка соломы, применявшейся для компостирования, и

белка плазмы азотобактера, как представителя почвенной микрофлоры.

Из данных таблицы 1 и прилагаемых хроматограмм (рис. 1 и 2) прежде всего следует, что долевое участие отдельных аминокислот в составе органического азота чернозема и подзолистой суглинистой почвы примерно одинаково, несмотря на значительное различие в химическом составе этих почв.

Аналогичные данные получены в нашей лаборатории З. Н. Берсеневой и для других почв, в частности для серозема, краснозема и подзолистой супесчаной почвы. Соотношение аминокислот во всех этих почвах оказалось достаточно однотипным.

Подзолистая почва, компостировавшаяся с большим количеством соломы, по аминокислотному составу также почти ничем не отличалась от исходной подзолистой почвы, хотя содержание в ней общего органического азота в результате компостирования возросло почти в 2 раза. Таким образом, белковый азот соломы, подвергаясь воздействию почвенных микроорганизмов, через сравнительно короткий промежуток времени превращается в характерные для данной почвы формы.

Приведенные в таблице 1 данные вместе с тем указывают на существенное различие в количественном содержании аминокислот в гидролизатах почв, с одной стороны, и в белковых гидролизатах плазмы азотобактера или соломы — с другой.

На единицу общего гидролизуемого азота в гидролизатах почвы приходится в общем в 2,5 раза меньше аминокислот, чем

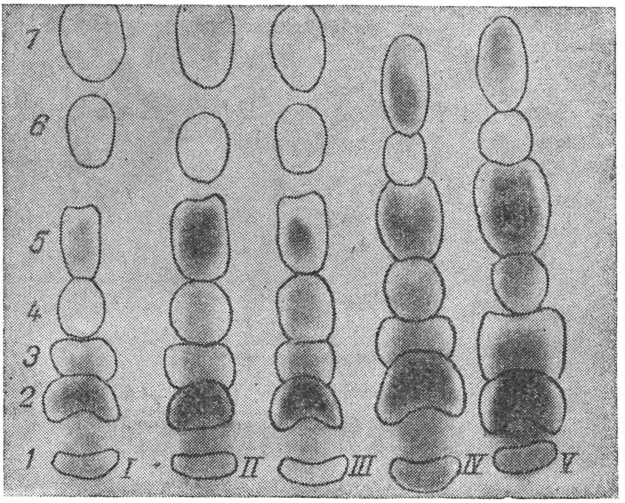


Рис. 1. Восходящая хроматограмма на водонасыщенном феноле гидролизатов органического вещества почвы, белка азотобактера и соломы:

I — подзолистая почва; *II* — подзолистая почва + солома; *III* — чернозем; *IV* — солома; *V* — азотобактер; *1* — аспарагиновая кислота; *2* — глутаминовая кислота; *3* — гликокол; *4* — треонин; *5* — аланин; *6* — аргинин; *7* — гистидин.

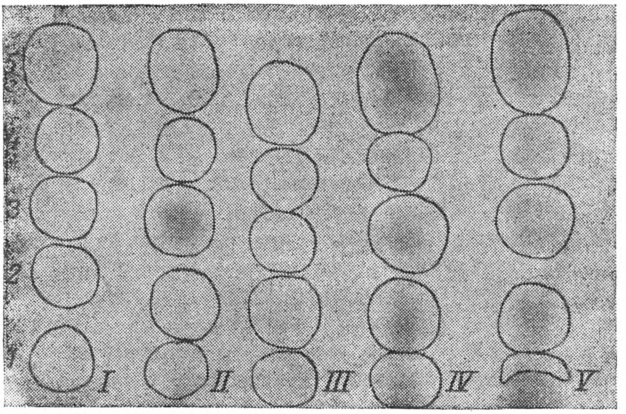


Рис. 2. Восходящая хроматограмма на смеси амиловый спирт + пропиловый спирт + уксусная кислота + вода (4 : 4 : 1) гидролизатов органического вещества почв, белков азотобактера и соломы:

I — подзолистая почва; *II* — подзолистая почва + солома; *III* — чернозем; *IV* — солома; *V* — азотобактер; *1* — пролин, *2* — тирозин; *3* — валин; *4* — фенилаланин; *5* — лейцин.

в белковых гидролизатах соломы или азотобактера. Следовательно, большая часть гидролизуемого 6-нормальной серной кислотой органического азота почвы представлена не аминокислотами, а другими, ближе не изученными формами.

Представляет интерес то обстоятельство, что соотношение отдельных аминокислот в гидролизатах почв очень близко к соотношению их в белках соломы и в особенности в белках азотобактера. Это видно из таблицы 2, в которой показано относительное распределение аминного азота между отдельными аминокислотами в гидролизатах почв, соломы и азотобактера.

Таблица 2

Азот отдельных аминокислот в процентах к общей сумме аминного азота, выделенного из гидролизатов почвы, соломы и азотобактера

Аминокислоты	Азотобактер	Солома	Подзолистая почва, компостировавшаяся с соломой	Исходная подзолистая почва	Мощный чернозем
Аспарагиновая кислота	5,6	6,7	10,6	6,3	6,7
Глутаминовая кислота	8,7	10,9	10,2	10,1	3,9
Аланин	12,0	**31,5**	21,2	14,8	14,8
Гликокол	**31,4**	21,6	**29,7**	**33,4**	**42,2**
Треонин	16,5	11,7	11,4	14,4	11,8
Валин	11,7	7,4	9,2	10,6	11,5
Лейцин	6,0	6,9	3,5	3,2	3,5
Фенилаланин	2,5	2,1	2,0	1,7	1,2
Тирозин + триптофан	4,0	1,6	2,4	1,9	2,2

В аминокислотном составе почвенных гидролизатов, так же как и в белках азотобактера, преобладающей в количественном отношении аминокислотой является гликокол, в белках соломы — аланин. Большое сходство аминокислотного состава почвенных гидролизатов и микробного белка азотобактера, по-видимому, связано с той огромной ролью, которую играют почвенные микроорганизмы в превращении органического вещества в почве.

Близость аминокислотного состава органического вещества почвы и бактериальной плазмы дает известные основания предполагать, что в почве аминокислоты связаны в веществах белковой природы, приобретших сравнительно большую устойчивость в результате процесса гумусообразования.

Трудно допустить, чтобы образовавшиеся при автолитическом распаде микробного белка аминокислоты вновь оказались бы в составе аминной фракции гумуса в тех же соотношениях, что и в исходной плазме. Это тем более кажется маловероятным, что некоторые свободные аминокислоты, как, например, гликокол, аланин, аспарагиновая и глутаминовая кислоты, под влиянием микроорганизмов чрезвычайно быстро аммонифицируются, другие же, как, например, ароматические аминокислоты, являются значительно более устойчивыми. Поэтому если бы образование аминной части гумуса происходило в результате последующих превращений свободных аминокислот, то имело бы место селективное обогащение гумуса более устойчивыми ароматическими аминокислотами и соответственно обеднение его легко аммонифицируемыми аминокислотами.

В действительности же, как мы видели, этого не происходит, и в составе аминной фракции почвенного гумуса, так же как и в аминокислотном составе микробного белка, преобладают легко аммонифицируемые в свободном состоянии аминокислоты.

По-видимому, связанные аминокислоты почвенного органического вещества, подвергаясь воздействию микроорганизмов, являются ближайшими источниками азота для образования в почве непосредственно усвояемых растениями его соединений — аммиака и нитратов. Более высокое абсолютное содержание усвояемого азота в черноземных почвах позволяет в благоприятные в метеорологическом отношении годы получать более высокие урожаи, чем на бедных азотом почвах нечерноземной полосы. Но даже в черноземной зоне, особенно в более влажной северной ее части, наличные запасы усвояемого азота в почве недостаточны для нормального обеспечения растений азотным питанием. Поэтому применение азотных удобрений имеет огромное значение для повышения плодородия почв на большей части территорий нашей страны.

В таблице 3 приведены данные, показывающие эффективность азотных удобрений под разные сельскохозяйственные культуры в основных почвенно-климатических зонах СССР, по

Таблица 3

Эффективность азотных удобрений в основных районах СССР по данным полевых опытов научных учреждений

Район	Почва	Культура	Доза азота, кг/га	Прибавка от азота, ц/га	Урожай контролей, ц/га	Учреждения, проводившие опыты
Средняя Азия	Серозем	Хлопчатник	110	16,9	19,2	ЦСУА СоюзНИХИ 1948—1952 гг.
Украина	Чернозем выщелоченный	Свекла сахарная	60	75	191	НИУИФ, географическая сеть
	Оподзоленный чернозем	Озимая пшеница	20 кг в подкормку	4,0	18,0	НИУИФ
	Чернозем мощный	Свекла сахарная	45	30	252	Граковское опытное поле НИУИФ
Нечерноземная полоса	Дерново-подзолистая суглинистая	Картофель	45	43	173	ДАОС и географическая сеть
		Озимая рожь	30 кг в подкормку	9,7	19,7	То же
	Песчаные и супесчаные	Озимая пшеница	30	7,2	18,0	„ „
		Картофель	75	100	90	„ „
		Рожь	30	6,6	7,0	„ „
Закавказье	Красноземы, субтропические почвы	Чай	300	28,5	18,0	Институт чая и субтропических культур
	Аллювиальные	Рис	120	15,4	19,0	Географические опыты НИУИФ

данным полевых опытов научных учреждений — научно-исследовательских институтов, опытных станций и опытных полей. В орошаемых районах Средней Азии и Закавказья применение азотных удобрений имеет решающее значение для получения высоких урожаев хлопка. Использование одной тонны азота минеральных удобрений под эту культуру окупается в зависимости от состояния агротехники 10—15 тоннами хлопка-сырца. Никакое другое удобрение и никакое другое мероприятие не дают столь высокого эффекта. И то, что в нашей стране достигнуты наиболее высокие урожаи хлопка, намного превосходящие уровень его урожайности в других странах, в значительной степени обязано интенсивному использованию азотных удобрений в наших хлопковых районах. Выражаясь образно, можно сказать, что наш хлопок — это трансформированная аммиачная селитра — главный вид азотного удобрения, используемого в хлопковых районах.

Черноземную зону по степени отзывчивости на внесение азотных удобрений грубо можно подразделить на две части: северную зону распространения оподзоленных деградированных и выщелоченных черноземов и отчасти мощных черноземов и южную зону неустойчивого и недостаточного увлажнения, где распространены обыкновенные и южные черноземы.

В северной части черноземной зоны применение азотных удобрений, как правило, является весьма эффективным.

Внесение азотных удобрений под сахарную свеклу дает прибавки в урожае от 50 до 70 ц на гектар, а внесение умеренных доз азота под зерновые повышает их урожай в среднем на 5—6 ц.

В южной степной части черноземной зоны, где сами почвы богаче азотом и где влага часто в минимуме, применение азотных удобрений обычно не сопровождается достаточно значительными эффектами. Получение хороших урожаев в этой зоне достигается в первую очередь мероприятиями по накоплению и сохранению влаги в почве, а из отдельных удобрений главная роль здесь должна быть отведена фосфатам, в особенности таким приемам их рационального применения, как внесение небольших доз гранулированного суперфосфата в рядки. Конечно, и здесь могут иметь место случаи эффективного использования азотных удобрений, но это не район массового их применения. При искусственном орошении потребность в азотных удобрениях будет и здесь резко проявляться.

Нечерноземная полоса, занимающая в пределах европейской части Союза огромную территорию, включающую около 40 млн. га посевов различных сельскохозяйственных культур, характеризуется исключительно высокой потребностью в азоте. Наличие достаточного количества влаги в этой полосе создает весьма благоприятные условия для эффективного использования азотных удобрений. Прибавки от азота выражаются весьма

высокими величинами для всех сельскохозяйственных культур — картофеля, овощей, зерновых и др. В этой зоне исключительно высокий эффект дает такой прием, как ранняя весенняя подкормка озимых азотными удобрениями, позволяющий при небольшой затрате удобрений (20—30 кг азота на гектар) получать дополнительно 5—6 ц зерна. В производственных опытах, проводившихся в течение ряда лет Долгопрудной агрохимической опытной станцией в колхозах Краснополянского района Московской области, прибавки от 30 кг азота, внесенного в подкормку, давали на больших площадях прибавку в урожае озимых от 6—7 до 10—12 ц на гектар. Соответствующие расчеты показывают, что при внесении указанных доз азотных удобрений в подкормку озимых в нечерноземной полосе и во влажной лесостепной зоне происходит наиболее полноценное использование азотных удобрений. В этом случае имеет место почти 100%-ное использование азота удобрения на синтез белка растений. К тому же применение азотных удобрений резко улучшает качество зерна (табл. 4).

Таблица 4

Влияние различных форм азотных удобрений на содержание клейковины, триптофана и тирозина в зерне озимой пшеницы в полевых опытах на Долгопрудной агрохимической опытной станции *

Удобрение	Прибавка от азота, ц/га	% сухой клейковины (сухое вещество)	% триптофана	% тирозина
Фон PK	—	9,25	0,283	0,596
Фон + 30 кг N в $(NH_4)_2SO_4$	7,2	14,75	0,284	0,759
Фон + 30 кг N в NH_4NO_3	6,8	12,50	0,334	0,720
Фон + 30 кг N в Ca $(NO_3)_2$	7,2	15,50	0,414	0,843

* Анализы выполнены аспирантом И. А. Козициной.

Как это следует из данных таблицы 4, при внесении всех форм азотных удобрений в подкормку в дозе 30 кг N на гектар резко повышается содержание клейковины в пшенице, что имеет большое значение для качества выпекаемого из пшеничной муки хлеба. Весьма важным является также и то, что при использовании для подкормки кальциевой селитры, являющейся перспективным видом азотного удобрения для нечерноземной полосы, резко возрастает содержание в зерне пшеницы триптофана, являющегося физиологически незаменимой аминокислотой, содержание которой в значительной мере определяет физиологическую полноценность белка, идущего в пищу человека или на корм животным. При недостатке триптофана в питании человека или животных происходят серьезные нарушения обмена веществ в организме, приводящие к тяжелым заболеваниям.

Наконец, весьма резко выражена потребность в азоте во влажных субтропических районах Закавказья, где урожай чая, например, полностью зависит от размеров снабжения этой культуры азотными удобрениями.

Развитие азотной промышленности в нашей стране позволило уже в настоящее время практически полностью обеспечить потребность в азотных удобрениях почти всех посевов технических культур, занимающих огромные территории, и приступить к снабжению азотными удобрениями продовольственных и кормовых культур в районах с наиболее высокой потребностью в азоте.

Директивы XX съезда КПСС по развитию народного хозяйства СССР в шестом пятилетнем плане на 1956—1960 гг. предусматривают увеличение общего производства минеральных удобрений более чем в 2 раза по сравнению с объемом их производства в 1955 г.

При соответствующем увеличении производства азотных удобрений уровень снабжения ими продовольственных культур (зерновых, картофеля, овощных и кормовых) значительно возрастет, и прежде всего в районах наибольшей потребности в азоте — в нечерноземной полосе и во влажной части черноземной зоны. Именно в этих зонах при достаточном снабжении азотными и другими удобрениями может быть гарантировано получение высоких и устойчивых по годам урожаев зерна.

На хозяйственных полях Долгопрудной агрохимической опытной станции на больших площадях при применении средних доз азота урожаи зерновых культур — ржи, озимой пшеницы — в течение последних 15 лет в среднем колебались около 30 ц зерна на гектар, а урожаи овса в связи с большей зависимостью его от летних осадков колебались по годам от 22 до 35 ц/га.

В колхозе им. Жданова Московской области, где проводятся в течение последних семи лет на больших площадях производственные опыты по проверке эффективности внесения небольших доз — 30 кг азота в подкормку озимых и внесения 10 кг N в рядки, в результате сочетания этих двух наиболее прогрессивных, наиболее высокоокупаемых приемов использования удобрений урожай озимых зерновых почти удвоился — около 25 ц зерна вместо 13 на неудобренных площадях. Если принять в качестве средней величины прибавку от 20—30 кг N, внесенного в подкормку озимых, 5 ц зерна, а прибавку от рядкового внесения 0,5 ц гранулированного суперфосфата — 3,5 ц зерна, то реализация только этих приемов под озимые зерновые во влажной зоне на площади 30 млн. га даст 25,5 млн. т зерна, или около 1,5 млрд. пудов при общей затрате удобрений около 750 тыс. т N и 300 тыс. т P_2O_5.

При наличии большего количества удобрений можно получать еще более высокие урожаи зерновых и других культур.

На Долгопрудной агрохимической опытной станции С. В. Щерба были заложены многолетние опыты по испытанию эффективности возрастающих доз минеральных удобрений на фоне без навоза и с навозом.

В таблице 5 приведены данные для яровой пшеницы и сахарной свеклы, из которых видно, что по мере увеличения доз азота на фоне фосфорных и калийных удобрений соответственно возрастают и урожаи этих культур как на фоне навоза, так и без него. Эти данные дают наглядное представление о полной беспочвенности и нелепости мнимого, так называемого закона убывающего плодородия и подтверждают имеющий место в действительности закон возрастающего плодородия, о котором всегда говорил Д. Н. Прянишников.

Таблица 5

Эффективность возрастающих доз азота на фоне РК в многолетних опытах на Долгопрудной агрохимической опытной станции

Доза азота, кг/га		Прибавки в урожае, ц/га			
		яровая пшеница		сахарная свекла	
яровая пшеница	сахарная свекла	фон навозный	без навоза	фон навозный	без навоза
30	120	9,2	8,0	149	75
45	180	14,8	15,1	192	139
60	240	18,3	17,2	239	183
75	300	21,5	24,6	295	300
Урожай контролей		16,1	11,4	80	48
Урожай по наивысшей дозе азота		37,6	36,0	375	300

Применение еще более высоких доз азота также дает соответствующее возрастание урожая, но в сырые годы зерновые столь сильно развиваются, что происходит их полегание. Так как в перспективе наше земледелие будет располагать такими количествами азотных удобрений, которые позволят применять их в достаточно высоких дозах и под зерновые культуры, то уже теперь весьма своевременным и важным является создание неполегающих сортов зерновых культур. В этом отношении хороший почин сделан Н. В. Цициным, выведшим высокопродуктивные и неполегающие пшенично-пырейные гибриды, уже зарекомендовавшие себя с лучшей стороны.

Таким образом, сельское хозяйство СССР могло бы весьма эффективно использовать большие количества азотных удобрений.

Широкое внедрение кукурузы (культуры, исключительно отзывчивой на азот) в структуру посевных площадей большей части районов СССР, в том числе и районов с сильной отзывчи-

востью на внесение азота, еще больше подчеркивает необходимость дальнейшего увеличения размеров производства азотных удобрений.

По произведенным нами примерным подсчетам для достаточно полного обеспечения всех сельскохозяйственных культур нашей страны азотными удобрениями потребуется примерно 2,5—3,0 млн. т азота. Успешное развитие химической промышленности в СССР позволяет считать, что снабжение нашего сельского хозяйства азотными удобрениями в таких размерах будет осуществлено в недалеком будущем. Но уже теперь весьма целесообразным является максимальное повышение удельной доли азотных удобрений в общей продукции минеральных удобрений.

За границей, в частности в США, в последние годы резко возросло применение на непосредственное удобрение жидких азотных удобрений — аммиака и аммиакатов. При производстве жидких азотных удобрений отпадает необходимость в строительстве ряда перерабатывающих цехов, как-то: упарки, кристаллизации, сушки, грануляции и т. п., что приводит к весьма значительному уменьшению капиталовложений в строительство новых азотных заводов и удешевляет себестоимость азота (на 30—40%). Если часть нашей азотнотуковой продукции будет выпускаться в виде жидких азотных удобрений, то это будет означать, что при одних и тех же капиталовложениях можно будет вести быстрее и больше выпускать азотных удобрений. Следует сказать, что именно у нас в СССР, в Научном институте по удобрениям и инсектофунгисидам впервые были проведены опыты по применению жидкого аммиака и аммиакатов на непосредственное удобрение, которые показали, что если исключить потери азота из этих удобрений при внесении их в почву, то аммиак и аммиакаты дают такой же эффект, как и обычные твердые азотные удобрения.

При наличии исключительно высокой потребности сельского хозяйства нашей страны в азотных удобрениях мы должны обратить особое внимание на разработку и внедрение в практику приемов более рационального использования этих видов удобрений.

В отличие от фосфатов азотные удобрения характеризуются высокой подвижностью в почве. Когда азотные удобрения не дают эффекта, обычно принято считать, что азот в данном случае не усваивается растениями. На самом деле это не всегда так бывает. Как показывают прямые опыты, азот даже в неблагоприятных условиях поступает в растение, но он не используется в дополнительном синтезе органического вещества для наращивания массы растений. В этом отношении показательны данные, приведенные в таблице 6.

При недостатке влаги применение азотных удобрений вызывает сильное обогащение вегетативных органов растений азотом, главным образом небелковым; азотные удобрения поглощаются

Таблица 6

Влияние условий водоснабжения на поступление азота в растения и эффективность его использования
(вегетационные опыты)

Почвы	Относительные величины			
	низкая влажность почвы		нормальная влажность почвы	
	урожай	азот в урожае	урожай	азот в урожае
Мощный чернозем без азота	100	100	100	100
То же + N	110	216	170	220
Серозем без азота	100	100	100	100
То же + N	102	203	224	296

растениями, но не используются на создание урожая. То же самое происходит и при недостатке фосфора или калия, когда избыток азота не только не дает хорошего эффекта, но оказывает иногда даже отрицательное влияние.

Таким образом, общие условия местообитания растений — агротехнический фон, обеспеченность фосфором и калием, влагой — оказывают большое влияние на полноценность растений и использование ими азотных удобрений.

Высокая подвижность азотных удобрений в почве имеет положительное значение для тех случаев, когда требуется быстрое усиление азотного питания растений, но в ряде случаев высокая подвижность азотных удобрений приводит к нежелательным последствиям. Это имеет место в районах избыточного увлажнения, где азотные удобрения подвержены вымыванию, например в субтропических районах Закавказья, и в районах с жарким климатом, например в Средней Азии, где азотные удобрения выносятся с восходящими токами влаги в иссушенный поверхностный слой почвы. Поэтому возникает необходимость в создании такого азотного удобрения и такого способа применения, при котором азот был бы хорошо доступен для растений, но вместе с тем обладал бы ограниченной подвижностью, как фосфор в преципитате.

В опытах, проведенных нашей лабораторией (В. И. Соколова) в последние два года, установлено, что при внесении крупногранулированного сульфата аммония очагами нитрификация его происходит чрезвычайно медленно, аммиачный азот фиксируется поглощающим комплексом почвы в очагах его внесения и очень слабо поддается вымыванию. Это видно из данных таблицы 7.

Одновременно задача получения малоподвижного, но доступного для растений азотного удобрения решалась путем синтеза полимеризованных труднорастворимых производных мочевины.

Таблица 7

Влияние грануляции и локального внесения сульфата аммония на его эффективность и вымываемость из подзолистой суглинистой почвы (доза азота — 0,5 г на сосуд)

Удобрения	Без промывания		С промыванием			
	урожай овса, г	азот в урожае, мг	урожай овса, г	азот в урожае, мг	азот в промывных водах, мг	вымыто азота из удобрений, мг
РК без азота	5,7	112	2,1	34	157	—
РК + $(NH_4)_2SO_4$ кристаллический, сплошное внесение	10,5	451	4,5	68	554	397
РК + $(NH_4)_2SO_4$ гранулированный, сплошное внесение	13,1	524	6,5	107	495	338
РК + $(NH_4)_2SO_4$ кристаллический, локальное внесение	13,6	499	8,7	146	457	300
РК + $(NH_4)_2SO_4$ гранулированный, локальное внесение	12,3	487	12,3	291	239	82

Работы в этом направлении производились на кафедре химической технологии МГУ под руководством акад. С. И. Вольфковича. Проведенные в этом году испытания таких препаратов показали, что некоторые из них содержат азот в нерастворимой трудновымываемой, но в то же время в сравнительно доступной для растений форме. Это можно видеть по данным таблицы 8.

Таблица 8

Использование растениями труднорастворимого азота полимеризованной мочевины (карбамиформы) *

Удобрения	Без промывания почвы	При промывании почвы		
	урожай, г	урожай, г	всего вымыто азота, мг	вымыто азота из удобрений, мг
Фон РК	30,3	9,6	165	—
Фон + карбамиформ I (41,5% общ. N, 10% раств. N)	43,1	27,9	350	185
Фон + карбамиформ III (32,1% общ. N, 3,4% раств. N)	43,1	22,2	213	66

Доза N = 600 мг

* Опыт проведен В. И. Соколовой.

Таким образом, намечаются новые пути повышения эффективности азотных удобрений в районах избыточного увлажнения и в районах с жарким сухим климатом.

Одной из важнейших задач нашего земледелия является широкое вовлечение в сельскохозяйственный круговорот атмосферного азота путем биологической его фиксации. Имеются два пути биологического связывания азота атмосферы: связывание азотобактером и другими свободноживущими микроорганизмами почвы и фиксация атмосферы в клубеньках бобовых растений.

Размеры связывания азота азотобактером, по-видимому, сильно меняются и зависят от состояния реакции почвы, влажности, наличия органического вещества, фосфатного режима и т. п. В практических условиях в поле за счет деятельности азотобактера и других свободноживущих бактерий может накапливаться примерно 10—15 кг и как максимум 20—25 кг азота в год. Большое значение для накопления азота азотобактером должно иметь известкование кислых почв нечерноземной полосы, так как в кислых почвах азотобактер растет очень плохо, относительно чего имеются многочисленные данные. Внесение препаратов азотобактера в почву для улучшения азотного питания растений, по-видимому, не достигает должной цели. Если для роста азотобактера в почве имеются благоприятные условия, то он хорошо развивается и без внесения его препаратов, если же условия неблагоприятны (кислая почва, недостаток фосфора и т. п.), то азотобактер будет плохо развиваться, в каких бы больших дозах мы ни вносили его препараты в почву.

Появляющиеся время от времени сообщения о высокой эффективности препаратов азотобактера при проверке их в строго контролируемых условиях научного опыта оказывались невоспроизводимыми.

На Долгопрудной агрохимической опытной станции в течение ряда лет испытывались различные штаммы азотобактера и заводские препараты азотогена при разных способах их внесения и ни разу за все это время не был получен доказуемый эффект от их внесения. Не помещая в этой статье всего имеющегося у нас по этому вопросу экспериментального материала (он частично опубликован, Турчин [7]), приведем все же данные одного опыта, проведенного совместно с Институтом сельскохозяйственной микробиологии ВАСХНИЛ в 1949—1950 гг., где азотобактер, помимо обычных способов его применения, вносился также в очень больших дозах — из расчета на содержание 0,42 г плазменного азота азотобактера на сосуд. В таких количествах азотобактер вносился как в живом, так и в мертвом виде с тем, чтобы оценить степень доступности растениям плазменного азота азотобактера.

Результаты этих опытов приведены в таблице 9.

В то время, как эффективность минерального азота была высокой, инокуляция препаратом азотобактера семян или почвы в течение двух лет опыта не оказывала влияния ни на урожай, ни на содержание азота в растениях и в почве. Внесение азотобактера как источника азота в огромном количестве из расчета

Таблица 9

Результаты вегетационных опытов с внесением препаратов азотобактера под овес

Схема опыта	Прямое действие, 1949 г.		Последействие, 1950 г.		Азот в урожае 1-го года опыта	Общий N в почве после 1-го года опыта
	зерно	солома	зерно	солома		
РК без азота	8,7	11,2	7,0	7,3	207	0,114
РК 0,21 г N в $Ca(NO_3)_2$	17,2	18,4	8,7	7,2	382	0,115
РК 0,42 г N в $Ca(NO_3)_2$	24,2	24,6	7,7	8,2	566	0,116
РК азотобактер с семенами	9,5	11,2	6,4	6,1	220	0,114
РК азотобактер в почву	9,6	11,4	6,5	9,1	222	0,114
РК 0,42 г N в виде клеток живого азотобактера	12,2	12,7	10,3	14,2	270	0,120
РК 0,42 г N в виде клеток мертвого азотобактера	12,4	13,1	9,1	9,8	273	0,120

0,42 г N на сосуд независимо от того, вносился ли азотобактер в живом или мертвом виде, давало примерно одинаковый и при этом весьма незначительный эффект.

На второй год плазма азотобактера также слабо использовалась растением. Все это говорит о том, что азотобактер не питает растение непосредственно азотом за счет выделения его в окружающую среду, как это думают некоторые научные работники. Растения используют только азот плазмы азотобактера после отмирания его клеток, причем в этом случае растениями в течение двух лет использовалось не более 30% от общего содержания азота в плазме азотобактера. Это указывает на очень медленную минерализацию белка азотобактера, что, повидимому, находит свое объяснение в высокой устойчивости нуклепротеидов, представляющих основную массу микробного белка, к гидролитическому ферментативному расщеплению.

Биологическое связывание азота в посевах бобовых растений, бесспорно, может играть огромную роль в разрешении азотной проблемы в земледелии нашей страны. Весьма целесообразным, в частности для песчаных почв, является возделывание сладкого люпина как ценной кормовой культуры, оставляющей одновременно в пожнивных остатках значительное количество биологически связанного азота.

Посевы многолетних бобовых трав — клевера и люцерны — могут служить весьма важным вкладом в азотный фонд нашего земледелия, прежде всего во влажных районах — в нечерноземной полосе и в северной части лесостепи.

Эффективность посевов этих трав в качестве азотонакопителей всецело определяется уровнем их урожайности.

В многолетних полевых опытах Долгопрудной агрохимической опытной станции проводится изучение пласта трав, как источника азота для последующих культур севооборота, идущих непосредственно по распаханному пласту и по его обороту на второй год. В этих опытах имеются варианты с чистым посевом клевера, чистым посевом тимофеевки и травосмеси клевера с тимофеевкой.

В вариантах с чистым посевом тимофеевки под культуры, идущие по пласту и его обороту, вносятся различные дозы минерального азота, что позволяет рассматривать эти варианты как своего рода шкалу для оценки эффективности клеверного и клеверо-тимофеечного пласта как источника азота для растений. Полученные данные приведены в таблице 10.

Таблица 10

Эффективность биологического азота, накапливаемого в почве посевами клевера и клеверо-тимофеечной травосмеси в многолетних опытах на известкованном подзолистом суглинке Долгопрудной агрохимической опытной станции

Среднее за 7 лет (1949—1955 гг.)

Травы-предшественники	Урожай сена трав за 2 года, ц/га	Дозы азота (кг/га) под последующие культуры		Урожай контролей и прибавки в урожае от биологического и минерального азота, ц/га	
		по пласту — картофель	по обороту пласта — овес	картофель — по пласту	овес (зерно) — по обороту пласта
Тимофеевка	36,6	0	0	203 *	19,3 *
То же	35,2	30	20	+44	+4,4
» »	37,2	60	40	+81	+6,4
» »	35,8	90	60	+100	+9,5
Клевер	70,3	0	0	+43	+1,6
Клевер + тимофеевка	74,6	0	0	+19	—
Клевер	72,3	60	40	+95	+7,2

* Урожай картофеля по пласту тимофеевки и овса по обороту пласта тимофеевки без внесения азотных удобрений принимается за контроль.

Таким образом, в среднем при урожае около 70 ц сена клевера в сумме за 2 года эффективность клеверища равноценна внесению примерно 40 кг минерального азота. В годы с низким урожаем клевера эффективность клеверища падала, а в годы с высоким урожаем возрастала и была равноценна примерно 80 кг минерального азота, что видно из данных таблицы 11.

Эффективность пласта травосмесей клевера с тимофеевкой во всех случаях была намного ниже, чем посевов чистого клевера, при практически равном урожае сена.

Таблица 11

Эффективность пласта трав как источника азота при различном уровне их урожая в многолетних полевых опытах на Долгопрудной агрохимической опытной станции

Травы-предшественники	Урожай сена в сумме за два года, ц/га	Дозы минерального азота под культуры, идущие по пласту и его обороту	Урожай, ц/га	
			картофель (по пласту)	овес-зерно (по обороту пласта)
Низкие урожаи трав				
Тимофеевка	28	Без азота	280	19,0
То же	30	I доза N	330	21,1
„ „	28	II доза N	382	20,5
Клевер	48	Без азота	306	19,0
Клевер + тимофеевка	54	„ „	287	19,0
Высокие урожаи трав				
Тимофеевка	32	Без азота	208	19,4
То же	38	I доза N	290	30,0
„ „	41	II доза N	355	41,3
Клевер	145	Без азота	334	28,2
Клевер + тимофеевка	154	„ „	272	24,9

Примечание: I доза N — 30 кг под картофель и 20 кг под овес.
II доза N — 60 кг под картофель и 40 кг под овес.

Таким образом, целесообразней производить чистые посевы клевера. В этом случае суммарный урожай трав будет не ниже, чем в травосмеси, но урожай последующих культур по чистым посевам клевера будет значительно выше, чем по травосмеси.

В нечерноземной полосе получение высоких урожаев клевера часто лимитируется наличием почвенной кислотности. Применение известкования в дозах, достаточных для устранения обменной кислотности почвы, будет иметь решающее значение для получения высоких урожаев клевера и одновременно для обогащения нашего земледелия азотом.

В последние два года в нашей лаборатории получены новые данные по изучению биологического связывания азота в клубеньках бобовых с применением изотопа N^{15}. Соответствующие опыты проводились в вегетационных сосудах объемом 7 кг почвы. Взрослые растения клевера, люцерны и гороха помещались в замкнутую атмосферу, обогащенную изотопом N^{15}. Через определенные сроки экспозиции в атмосфере N^{15} растения снимались. Исследовались отдельно клубеньки, корни, стебли и листья. Из всех органов растений выделялись небелковые органические соединения азота, свободные аминокислоты и амиды клеточного сока растений, растворимые и нерастворимые белки плазмы. Во всех этих фракциях определялось путем измерения на масс-спектрографе содержание изотопа N^{15}.

Следует отметить, что до последнего времени опыты по изучению фиксации азота проводились только на изолированных от растений клубеньках; при этом исследовались только водо- или кислотнорастворимые фракции клубенька Aprison и др. [11, 12], Zelitch и др. [15], Allen и др. [13, обзорная статья]. В наших исследованиях принимали участие З. Н. Берсенева, Е. Г. Плышевская, М. А. Гуминская. В таблице 12 приведены данные, полученные в опытах с люцерной.

Таблица 12

Результаты исследований по изучению биологической фиксации азота клубеньками люцерны при экспозиции ее в атмосфере меченого азота с 3,13-кратным обогащением изотопом N^{15} *

Части растения	Выделенные из растения фракции азота	Продолжительность экспозиции							
		24 часа		48 часов		48 час. N^{15}, затем 24 часа обычный азот атмосферы		48 час. N^{15}, затем 48 часов обычный азот атмосферы	
		Z **	% меченого азота	Z	% меченого азота	Z	% меченого азота	Z	% меченого азота
Клубеньки	1) водорастворимый амидный азот из клеточного сока клубеньковой ткани	2,14	53,5	1,95	49,1	—	—	—	—
	2) азот свободных аминокислот из клеточного сока клубеньковой ткани	1,64	30,0	1,41	19,5	1,24	8,9	1,07	2,4
	3) белковый азот клубеньков	1,05	2,3	1,17	8,0	1,05	1,9	1,09	3,1
Корни	Водорастворимый азот	1,17	8,0	1,19	8,9	—	—	—	—
Стебли	То же	1,13	6,2	1,31	14,6	—	—	—	—
Листья	» »	1,14	6,6	1,16	7,0	—	—	—	—

* За 1 принято содержание N^{15} в обычном азоте (0,39%).
** Z — степень обогащения изотопом N^{15} выделенных из растений фракций азота.

Из данных этой таблицы следует, что как при 24-часовой, так и при 48-часовой экспозиции люцерны в атмосфере, обогащенной изотопом N^{15}, максимальное количество меченого азота было обнаружено в составе водорастворимой амидной фракции, выделенной из клеточного сока клубеньковой ткани. В значительном количестве, но меньше, чем в амидной фракции, мече-

ный азот был обнаружен в составе свободных аминокислот, выделенных также из клеточного сока клубеньковой ткани.

Но в составе белковых веществ клубеньков меченый азот почти отсутствовал в первые 24 часа, а при более длительной, 48-часовой экспозиции он был найден в весьма незначительном количестве. Так как плазменный азот клубеньковых бактерий полностью попадает в выделенную белковую фракцию, то отсутствие или, в лучшем случае, крайне низкое содержание меченого азота в этой фракции свидетельствует о том, что фиксация атмосферного азота происходит не в клетках клубеньковых бактерий.

Очевидно, процесс биологического связывания азота атмосферы локализован на поверхности клубеньковой ткани корней, ибо только этим можно объяснить огромное содержание меченого водорастворимого азота в клеточном соке клубеньковой ткани при почти полном отсутствии меченого азота в белковых фракциях клубеньков.

Таким образом, биологическое связывание азота у бобовых осуществляется не бактериями, а высшим растением в его клубеньковой ткани, представляющей перерожденную ткань корня.

Клубеньковые бактерии, проникая в корни бобовых, индуцируют образование специфической клубеньковой ткани, и в этом заключается их важная роль в процессе связывания азота бобовыми. Вероятно, бактерии выделяют какое-то вещество, под воздействием которого образуется на корнях бобовых специфическая клубеньковая ткань, обладающая соответствующей ферментной системой, при участии которой и осуществляется связывание атмосферного азота. И, может быть, когда-нибудь удастся установить химическую природу этого вещества, синтезировать его и искусственно, без участия бактерий, вызывать биологическое связывание азота атмосферы не только бобовыми, но и другими растениями. Существующее до сих пор представление о том, что фиксация азота атмосферы происходит в телах клубеньковых бактерий, нам кажется, не соответствует фактическому положению.

В действительности, как это следует из приведенных здесь данных, а также из ряда других наших опытов, как с люцерной, клевером и горохом, где получены такие же результаты, клубеньковые бактерии не фиксируют молекулярного азота. Поэтому до сих пор никому не удавалось наблюдать доказуемую фиксацию азота изолированными от растений клубеньковыми бактериями. И если у некоторых исследователей в отдельных случаях как будто бы и происходила фиксация азота изолированными клубеньковыми бактериями, то, по-видимому, в этом повинны как степень точности метода исследования, так и случайные загрязнения среды.

Процесс биологического связывания азота клубеньковой тканью бобовых происходит с достаточно высокой интенсивностью.

Соответствующие расчеты, основанные на долевом участии меченого азота в различных органах и частях растений, показали, что за 24 часа растения люцерны фиксируют по разным опытам от 40 до 60 мг азота на сосуд при массе растений в 25—30 г в пересчете на сухой вес, т. е. 1,5—2,0 мг азота на 1 г сухого веса растений.

Фиксированный в клеточном соке клубеньков азот непрерывно отводится в корни, стебли и листья.

В какой-то мере фиксированный клубеньковой тканью азот попадает, разумеется, и в тела клубеньковых бактерий, которые, таким образом, живут за счет азота растения хозяина.

Из данных приведенной выше таблицы видно, что при смене атмосферы меченого азота на обычную атмосферу меченый азот через 24 часа после этого почти полностью уходит из клубеньков — его вытеснил обычный азот. Следует сказать, что общее содержание водорастворимого амидного и аминного азота в клубеньковой ткани бобовых в среднем из ряда опытов составляло около 15 мг N на сосуд с массой растений 25—30 г сухого веса (в тех же условиях содержание белкового азота в клубеньках составляло 25—30 мг N на сосуд). Если бы не было непрерывного оттока, фиксированного клубеньковой тканью азота в другие органы растения, то можно было бы сказать, что в течение суток происходит трех- или четырехкратная смена фиксированного в клубеньках азота.

Таблица 13

Аминокислотный состав небелковой фракции азота в корнях и клубеньках люцерны

	Азот аминокислот, мг N на 100 г сырой массы		Азот аминокислот, % к общему водорастворимому небелковому азоту	
	корни	клубеньки	корни	клубеньки
Пролин	6,85	4,82	5,28	2,45
Триптофан	7,20	6,80	5,54	3,46
Валин	3,17	4,74	2,44	2,417
Фенилаланин	1,70	1,52	1,30	0,40
Лейцин	1,07	2,24	0,825	1,90
Аспарагиновая кислота	4,20	2,84	3,27	1,44
Глутаминовая кислота	7,60	7,80	5,85	3,97
Аспарагин	76,00	118,00	58,50	60,50
Аланин	11,80	11,20	9,07	5,70
Аргинин	10,30	36,50	7,94	28,50

Детальное исследование азотистых составных частей клеточного сока клубеньковой ткани с применением хроматографического анализа позволило установить, что почти весь водорастворимый небелковый азот в этом случае представлен аминокислотами и аспарагином. В общем же, как видно из данных таблицы 13, имеется значительное сходство аминокислотного состава небелковых фракций клубеньков и корней люцерны. Различие заключается в основном в более высоком содержании в клубеньках аргинина. Но что особенно нам кажется интересным, — это огромное содержание в клубеньках и корнях аспарагина.

Выше уже отмечалось, что меченый азот в первую очередь и в больших количествах обнаруживается именно в аспарагине, в амидной фракции. Так как аспарагин образуется в растениях в результате взаимодействия аммиака с аспарагиновой кислотой, то имеются основания считать, что именно аммиак и является одним из первичных (если только не первым) продуктов биологической фиксации азота атмосферы в клубеньковой ткани бобовых растений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блок Р. Хроматография на бумаге. ИЛ., М., 1954.
2. Ваксман С. С. Гумус, происхождение, химический состав и значение его в природе. Сельхозгиз, 1937.
3. Драгунов С. С. и Бахтина Е. Органо-минеральные удобрения, Тр. НИУИФ, вып. 127, 1936.
4. Кононова М. М. Проблема почвенного гумуса и современные задачи его изучения. Изд. АН СССР, 1951.
5. Прянишников Д. Н. Азот в жизни растений и в земледелии. СССР, изд. АН СССР, 1945.
6. Рачинский В. В. и Гапон Е. Б. Хроматография и ее применение в биологии, 1953.
7. Турчин Ф. В. Об удобрительной ценности препаратов азотобактера. «Почвоведение» № 6, 1944.
8. Тюрин И. В. Органическое вещество почв. М., Сельхозгиз, 1937.
9. Тюрин И. В. Географические закономерности гумусообразования. Тр. юбил. сессии АН СССР, посвященной столетию со дня рождения В. В. Докучаева. Изд. АН СССР, 1949.
10. Шмук А. Н. К химии органического вещества почвы. Тр. Кубан. с.-х. института, т. II, вып. 2, 1924 г.
11. Aprison M. H. and Burris R. H. Time course of fixation of N_2 by excised soybean nodules. Science., vol. 115, N 2984, 1952.
12. Aprison M. H., Magee W. E., Burris R. H. Nitrogen fixation by excised soybean root nodules Journ. Biolog. chem., vol. 208, N 1, 1954.
13. Allen O. H. and Baldwin J. L. Rizobia — legume relationships. Soil. Science, vol. 74, N 6, 1954.
14. Susukis. Studies on humus formation. Bull. Col. Agron. Tokya, 1908.
15. Zelitch J., Wilson P. W. and Burris R. H. The aminovacid composition and distribution of N^{15} in soybean root nodules supplied N^{15} enriched N_2. Plant. Physiology., vol. 37, 1952.

ПИТАНИЕ РАСТЕНИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ *

В агрономической химии и физиологии растений принято прочно установленное положение, что непосредственными источниками азота, фосфора, калия, серы и других элементов, необходимых для жизни растений в обычных условиях их произрастания, являются неорганические соединения. Хотя было показано, что растения могут в известной мере усваивать и некоторые органические соединения азота и фосфора (некоторые аминокислоты, фитин), но встречаемость этих соединений в природных условиях крайне ограниченна, и они не могут играть сколько-нибудь существенной роли в общем потреблении растениями питательных веществ.

В последнее время академиком Т. Д. Лысенко развиваются представления, согласно которым минеральные удобрения, содержащие питательные элементы в катионах или анионах, не являются готовой пищей для растений. Они — минеральные соли — идут сначала на питание почвенных микроорганизмов, которые перерабатывают их в вещества, непосредственно усваиваемые растениями. При таком взгляде на вещи система удобрений должна строиться с точки зрения наиболее полноценного их использования бактериями. Так как подавляющее большинство почвенных микроорганизмов не способно синтезировать органическое вещество за счет ассимиляции углекислоты, то возникает необходимость снабжения этих микроорганизмов не только элементами минерального питания, но и органическим веществом. Для лучшего использования микроорганизмами как органического вещества, так и минеральных веществ они, согласно представлениям Т. Д. Лысенко, должны вноситься в тесном контакте. Отсюда вытекает система удобрений Т. Д. Лысенко, сводящаяся к внесению органического вещества в смеси с фосфорными и известковыми удобрениями в верхний слой почвы на глубину 7—10 см, где находятся корни растений. Бактерии, находящиеся в прикорневой зоне растений, в этом случае, по мнению Т. Д. Лысенко, будут обеспечены органическим и минеральным питанием и, в свою очередь, будут хорошо питать культурное растение.

Рассмотрим сначала, в какой степени все эти представления согласуются с результатами экспериментальных данных о поступлении в растения отдельных питательных элементов и их использовании растениями.

Напомним прежде всего, что в искусственных водных и песчаных культурах, в том числе и в стерильных условиях, растения растут совершенно нормально, нормально развиваются и плодоносят, если они обеспечены питательными веществами, которые вносятся в виде обычных минеральных солей. Следова-

* Статья опубликована в журнале «Почвоведение» № 6, 1954.

тельно, принципиально растения при усвоении ими питательных минеральных веществ не нуждаются в каком-либо посредничестве бактерий или сотрудничестве с ними. Но когда мы ссылаемся на эти совершенно достоверные и никем не опровергнутые факты, то сторонники «бактериальной теории» питания растений делают возражения против обобщения результатов этих опытов на реальную обстановку в полевых условиях, где в почве обитает огромное количество различных микроорганизмов, которые, по их мнению, не должны оставаться безучастными к такому важному процессу, как питание растений.

Но ведь уже давно в работах многих исследователей было показано, что, анализируя растения, произраставшие в полевых условиях, мы неизбежно находим в его тканях питательные вещества в той именно форме, в какой они были внесены в почву. Если в почву вносился нитратный азот, то и в растениях мы найдем нитраты, фосфор в виде обычных солей ортофосфорной кислоты, калий в виде калийных минеральных солей и т. п.

Поступая в растения в виде минеральных солей, питательные элементы претерпевают в организме растений ряд превращений, более глубоких в одних и менее глубоких в других случаях, но при некотором избытке питательных элементов в почве скорость их переработки в растениях в большей или меньшей степени отстает от скорости их поступления. Благодаря этому в растениях, произраставших в полевых условиях, всегда в том или ином количестве находятся питательные элементы в той именно форме, в какой они поступили в растения. При этом содержание в растениях отдельных питательных элементов в минеральной форме в значительной степени зависит от степени обеспеченности ими почвы, от интенсивности применения удобрений. На этом и основан начинающий широко внедряться в практику метод диагностики состояния питания растений по содержанию в их тканях солей азотной кислоты, солей фосфорной кислоты, калийных солей, хлоридов, сульфатов. Но могут сказать, что накопление в тканях растений нитратов, фосфатов и т. п. потому и происходит, что растение их не использует или во всяком случае хуже использует для построения своего тела, чем гипотетические продукты переработки этих соединений микроорганизмами. Изучение питания растений, проведенное в последние годы с применением новых средств исследования — метода меченых атомов и хроматографического анализа, полностью снимает и это возражение. Применяя в качестве метки фосфорных удобрений радиоактивный изотоп фосфора P^{32}, мы можем проследить, как скорость поступления в растения фосфатов, так и последовательность, равно как и скорость превращения в растениях минеральных фосфатов в органические соединения — сахаро-фосфаты, фосфатиды, белки.

В результате такого рода исследований установлено, например, что фосфорная кислота очень быстро поступает в растение и очень быстро используется на построение органических веществ, необходимых для нормального роста и развития растений. Уже через несколько минут после внесения в почву меченого фосфорного удобрения оно может быть обнаружено во всех органах растения.

Т. Д. Лысенко утверждает, что корневая система растений * «с жизненной необходимостью взаимосвязана не с одним только данным, уже выявленным видом почвенных микроорганизмов, но и с рядом других еще пока не выявленных наукой почвенных микроорганизмов, под энзиматическим воздействием которых неудобоусвояемые формы веществ и элементов органической, минеральной и воздушной среды превращаются в формы, удобоусвояемые для растений».

Он проводит аналогию между пищеварительной системой животных, в которых «пища из форм, не пригодных для усвоения, превращается в формы, усвояемые живым телом» и почвенными микроорганизмами, которые выполняют ту же роль в питании растений. Вряд ли кто может усомниться в огромном значении микроорганизмов в жизни почвы. Сама почва является в значительной мере продуктом жизнедеятельности микроорганизмов. Не может быть сомнений и относительно огромного значения микробиологической активности почвы для питания произрастающих на этой почве растений. Почвенные микроорганизмы, за исключением нитрифицирующих бактерий, являются гетеротрофными организмами. Они синтезируют органическое вещество своего тела за счет разложения органических остатков растений и животных и за счет гумуса почвы. Органическое вещество необходимо не только для построения тела микроорганизмов, но в процессе его разложения, его окисления освобождается энергия, необходимая микроорганизмам для проявления их жизнедеятельности. Образующиеся же в процессе разложения органического вещества минерализованные соединения азота, фосфора, серы являются источниками питания растений. Но совсем не обязательно, чтобы этот осуществляемый микроорганизмами почвы процесс освобождения питательных для растений элементов из органических их соединений происходил именно у корней растений. Наоборот, есть все основания считать, что разложение органического вещества и превращение содержащихся в нем соединений азота, фосфора и т. п. в минеральную, т. е. доступную для растений форму, наиболее энергично протекает в парующей почве, когда нет конкуренции со стороны растений за воду и кислород воздуха. Об

* Здесь, так же как и в других местах этого доклада, цитаты позаимствованы из статьи Т. Д. Лысенко «Задачи науки о почвенном питании растений в повышении урожайности сельскохозяйственных культур» в журнале «Достижения науки и передового опыта в сельском хозяйстве» № 11, 1953.

этом достаточно наглядно говорят многочисленные данные различных наблюдений над образованием аммиака и нитратов на паровых полях и под растениями.

Проводимая Т. Д. Лысенко аналогия между пищеварительной системой в питании животных и почвенными микроорганизмами в питании растений принципиально ошибочна. Организм растений не нуждается в предварительной подготовке бактериями его минеральной пищи для того, чтобы она могла быть им усвоена, т. е. переработана в те именно вещества, из которых состоит тело растений. Весь процесс переработки исходных неорганических веществ, необходимых для питания растений, например от аммиака или нитратов до белка протоплазмы, совершается через все промежуточные стадии в самом растении при содействии его собственных ферментных систем.

Применение методов хроматографии при исследовании азотного питания растений в нашей лаборатории позволило установить, что поступивший в растение аммиачный азот уже через 5—10 минут превращается в корнях растений в аминокислоты. При нормальных условиях роста растений и при концентрации аммиачного азота, не превышающей известные пределы, поступивший в растение аммиачный азот полностью перерабатывается в корнях в аминокислоты и не доходит до надземных органов растений. При некотором избытке аммиачного азота в среде и при недостаточном снабжении калием скорость поступления аммиака в растение заметно превышает скорость его использования на синтез аминокислот в растениях, и в таких случаях аммиак может накапливаться в них в тех или иных количествах. Этим путем установлена последовательность в синтезе отдельных аминокислот в растении.

Показано, что первой аминокислотой, образующейся в растении, является аланин, далее идут дикарбоновые аминокислоты — аспарагиновая и глутаминовая. Основные аминокислоты и ароматические аминокислоты образуются позже, в результате процессов переаминирования. Тот факт, что первой аминокислотой, синтезируемой в растениях в результате переработки аммиака является аланин, по-видимому, обусловлен тем, что в растениях в качестве постоянного метаболита в процессе дыхания всегда образуется пировиноградная кислота, которая очень легко подвергается восстановительному аминированию аммиаком с образованием аланина. Применяя азотную подкормку, меченную тяжелым изотопом азота N^{15}, удалось показать, что синтезированные за счет внесеннего в подкормку минерального азота аминокислоты быстро идут на синтез белковых веществ растений. Оказалось, что весь путь превращений внесенного в подкормку минерального азота, от почвы до конституционных белков протоплазмы листьев растений, измеряется при интенсивно идущем синтезе 3—4 часами. Проведенными в последние годы в нашей лаборатории исследованиями было показано, что

синтезированные в растениях белки постоянно обновляются в своем азотистом составе. Установлена исключительно большая скорость этого обновления белка. Так, в молодых растениях овса в течение 72 часов полностью обновляется азотистый состав белков. Отдельные молекулы белка, таким образом, не являются сколько-нибудь долговечными — они непрерывно распадаются и вновь воссоздаются. Продолжительность жизни индивидуальных молекул конституционных белков протоплазмы исчисляется несколькими часами. В опытах последнего года получен новый экспериментальный материал, который позволяет сделать вывод, что скорость обновления отдельных групп белковых веществ изменяется в зависимости от фазы развития растений и от состояния питания растений. Интенсивность обновления конституционных белков при неблагоприятных условиях роста растений уменьшается, уменьшается она также и по мере старения растений.

Установление положения об исключительно высокой интенсивности обмена белка в растениях объясняет отмечавшиеся многократно как в опытах, так и в практике факты высокой эффективности мероприятий по поддержанию высокого уровня снабжения растений азотом на протяжении периода их наиболее интенсивного роста. Но так как в синтезе и обмене белка огромную роль играют и другие необходимые для питания растений элементы (фосфор, калий и т. д.), то степень обеспеченности растений в периоды наибольшей интенсивности их роста и этими элементами должна иметь огромное значение для роста и развития растений, для создания высоких урожаев. Поэтому создание оптимальных условий питания, оптимальной среды для развития самих растений должно явиться основной заботой практического работника сельского хозяйства.

В представлениях же, развиваемых Т. Д. Лысенко, основной упор в мероприятиях по применению удобрений делается не на улучшение непосредственного питания растений, а на улучшение питания бактерий, которые, по его мнению, в свою очередь снабжают пищей растения.

Значение микроорганизмов в жизни почвы, конечно, исключительно велико. Поскольку почва является средой для роста растений, то в этом смысле микроорганизмы имеют огромное значение и для жизни растений. Но сами растения для усвоения питательных элементов из почвы не нуждаются в посредничестве микроорганизмов. На Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ с 1937 г. проводятся многолетние опыты, в которых изучается действие различных доз минеральных удобрений, вносимых на безнавозном фоне и на фоне 40 т навоза за четырехпольный севооборот.

Казалось бы, что на хорошем навозном фоне, где микробиологическая активность почвы должна быть значительно выше, чем на фоне без навоза, использование растениями вносимых

минеральных удобрений должно быть более полноценным, если только почвенные микроорганизмы в какой-то степени действительно участвуют в питании растений.

В действительности же степень полноценности использования растениями различных доз минеральных удобрений как на фоне навоза, так и без навоза во все годы опыта была примерно одинаковой. Это можно видеть из данных таблицы 1 для последнего (1953 г.) опыта.

Таблица 1

Эффективность различных доз минеральных удобрений на фоне навоза и без навоза в многолетних опытах Долгопрудной агрохимической опытной станции
(Почва — подзолистая, суглинистая, произвесткованная из расчета на нейтрализацию обменной кислотности)

Дозы минеральных удобрений, кг/га действующих элементов за севооборот	Прибавки в урожае от минеральных удобрений, ц/га			
	на фоне навоза		на фоне без навоза	
	яровая пшеница — зерно	сахарная свекла — корни	яровая пшеница — зерно	сахарная свекла — корни
NPK 200	9,2	101	8,0	74
NPK 300	14,2	144	15,1	139
NPK 400	18,3	191	17,2	183
NPK 500	21,5	215	19,4	240
NPK 600	21,5	247	24,6	252
Урожай контрольных вариантов, ц/га	16,1	128	11,4	48,4

В вегетационный сезон 1953 г. в этом опыте было проведено микробиологическое исследование почвы по отдельным вариантам опыта.

Исследовалась почва контрольных вариантов на обоих фонах и вариантов с наиболее высокой дозой минеральных удобрений по фону навоза и без навоза. Исследования выполнены Институтом сельскохозяйственной микробиологии Академии сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина У. Г. Оксентьяном под руководством К. И. Рудакова.

Результаты исследований приведены в таблице 2.

В вариантах с внесением навоза почва значительно богаче микрофлорой, чем без навоза. Систематическое внесение наиболее высоких в опыте доз минеральных удобрений в отсутствие навоза повлекло резкое уменьшение численности бактериального населения в почве. Внесение тех же доз минеральных удобрений на навозном фоне вызвало только некоторое понижение количества бактерий в сравнении с вариантом, где вносился один навоз (фон). В общем же количество различных групп бактерий в почве варианта 600 кг/га NPK + навоз было в ты-

Таблица 2

Влияние удобрений на микрофлору почвы в полевых опытах ДАОС

(Опыт «Действие навоза и минеральных удобрений при совместном и раздельном их применении». Поле — сахарная свекла, 1953 г.)

Вариант опыта	Нитрификация, % зон	Количество клеток в 1 г почвы, тыс. штук.				Азотобактер, % обрастания комочков
		динитрификаторы	аммонификаторы	аэробные клетчатковые бактерии	анаэробные азотфиксаторы	
Без удобрений	3,3	242	3030	390	30	95
Навоз	11,4	3030	30300	296	72	97
NPK 600 кг/га за севооборот	0	30	30	3	7	0
Навоз + NPK 600 кг/га за севооборот	13,8	1334	8495	683	30	19

сячи и в сотни тысяч раз больше, чем в почве, где вносились в соответствующей дозе только одни минеральные удобрения. Однако, несмотря на такое исключительно резкое различие в численности микроорганизмов, различий в эффективности минеральных удобрений в обоих этих вариантах опыта не было. Внесение минеральных удобрений в обоих случаях давало очень высокие прибавки в урожае всех культур севооборота. При этом увеличение доз минеральных удобрений вызвало и соответственно возрастание урожая.

Академик Т. Д. Лысенко в доказательство правильности высказываемых им положений о роли микроорганизмов в питании растений и преимущества вытекающей из этих положений рекомендуемой им системы удобрения приводит данные опыта с озимой пшеницей, проведенного академиком А. А. Авакяном в 1953 г. в экспериментальном хозяйстве Академии с.-х. наук им. В. И. Ленина.

В таблице 3 приводятся данные по основным вариантам этих опытов.

Таблица 3

Вариант опыта	Урожай пшеницы, ц/га	Прибавка от удобрений, ц/га
Контроль	17,8	—
1,8 т перегноя	24,1	6,7
3 ц суперфосфата	22,0	4,2
3 ц извести	19,9	2,1
Смесь 1,8 т перегноя с 3 ц суперфосфата и 3 ц извести	28,7	10,9

Строго говоря, эти опыты не могут рассматриваться как доказательство положений, выдвинутых Т. Д. Лысенко. Из них не вытекает вывода о том, что эффективность суперфосфата и малых доз извести становится более высокой, когда эти удобрения вносятся в смеси с перегноем, а не раздельно. Суммарная прибавка в урожае пшеницы, полученная от раздельного внесения отдельных компонентов смеси, даже выше, чем при внесении их в смеси.

Т. Д. Лысенко развивает весьма своеобразное представление относительно чувствительности растений к кислотности почвы. Он считает, что плохие урожаи на кислой почве обусловлены не чувствительностью самих растений к кислотности почвы, а чувствительностью микроорганизмов к кислой реакции.

«Сама по себе кислотность почвенного раствора для сельскохозяйственных растений и их корневой системы не вредна, — пишет Т. Д. Лысенко, — вредное для сельскохозяйственных растений действие кислой почвенной среды связано с тем, что, как уже говорилось, в ней не могут жить бактерии, продуктами жизнедеятельности которых питаются эти растения».

Отсюда Т. Д. Лысенко делает заключение, что можно и на кислой почве получать высокие урожаи всех культур, если устранить вредное действие кислотности почв на бактерии. Последнее может быть достигнуто внесением смеси органического вещества (перегноя или торфа) с фосфорными удобрениями и с небольшим количеством извести в тех дозах и соотношениях этих веществ, которые он рекомендует для широкого испытания и внедрения. В этом случае, по мнению автора этого предложения, в почве создаются очажки органического вещества, пропитанные суперфосфатом и известью.

В этих очажках почвенная бактериальная флора находит хорошие условия для своей жизнедеятельности. При такой системе удобрения культурные растения хорошо будут развиваться и на кислой почве, питаясь содержащими фосфор продуктами жизнедеятельности бактерий.

Весной 1953 г. в нашей лаборатории были заложены в условиях вегетационного павильона опыты по проверке эффективности системы удобрения, рекомендуемой Т. Д. Лысенко, на почве с повышенной кислотностью под такие чувствительные к кислой реакции растения, как яровая пшеница и клевер.

На том поле станции, откуда была взята для опытов почва, рост таких растений, как пшеница, клевер, свекла, был сильно подавлен; менее же чувствительные к кислотности растения, как рожь, овес, картофель, давали удовлетворительные урожаи. pH солевой вытяжки из этой почвы — 4,0, обменная кислотность — 1,8 мг-экв. на 100 г почвы.

В этих опытах система удобрения, рекомендуемая Т. Д. Лысенко, сравнивалась с обычными приемами использования минеральных удобрений и известкования кислых почв.

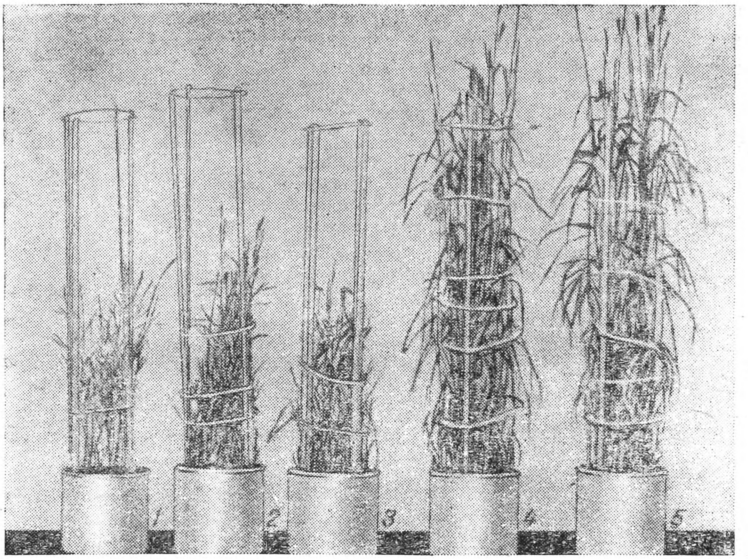


Рис. 1. Яровая пшеница в вегетационных опытах на кислой подзолистой почве:

1 — без удобрений; *2* — тройная смесь по Т. Д. Лысенко: 6 г перегноя, 1 г суперфосфата и 1 г извести; *3* — тройная смесь по Т. Д. Лысенко + 0,6 г азота; *4* — известь по $1^1/_2$ обмен. кислотности, 1 г суперфосфата и 0,6 г азота; *5* — известь по $1^1/_2$ обмен. кислотности, 0,5 г суперфосфата, местно 0,6 г азота.

В вариантах, где испытывалась смесь удобрений, рекомендуемая Т. Д. Лысенко, отдельные компоненты смеси были взяты в тех соотношениях, как это было указано в работах Т. Д. Лысенко, но в удвоенной норме против полевой дозы. На сосуд с 6 кг почвы в этом варианте опыта вносилась смесь из 6 г хорошо перепревшего перегноя из парников, 1 г суперфосфата и 1 г углекислой извести. В качестве общего фона во всех вариантах опыта вносился хлористый калий в количестве 0,6 г K_2O на сосуд.

Опыты проведены В. И. Соколовой.

Схема и результаты опыта с яровой пшеницей приводятся в таблице 4. О состоянии растений в опыте во время их роста можно судить по прилагаемым фотографиям (рис. 1, 2, 3, 4).

Полученные в этом опыте результаты позволяют прежде всего сделать общий вывод о том, что вредное действие почвенной кислотности на растение не может быть устранено путем внесения малых доз извести в смеси с перегноем и суперфосфатом. Если даже допустить, что внесение этой смеси в кислую почву и гарантирует хорошее развитие почвенной микрофлоры, то это мало что меняет в состоянии растений. Внесение органо-

Таблица 4

Вариант опыта *	Урожай яровой пшеницы, г/сосуд	
	зерно	солома
1. Без удобрений	1,0	6,6
2. Смесь — 6 г перегноя, 1 г суперфосфата и 1 г извести	4,0	8,9
3. То же + 0,6 гN	0,9	7,0
4. Известь по $1^1/_2$ обменной кислотности (8 г) + + 1,0 г суперфосфата	6,5	15,4
5. То же + 0,6 гN	15,1	27,6
6. То же, что в варианте 5, + 6 г перегноя	17,0	25,3
7. Известь по $1^1/_2$ обменной кислотности + + 0,6 гN + 0,5 г суперфосфата местно под семена	17,1	27,8
8. То же, что в варианте 7, + 0,5 г суперфосфата в нижний слой почвы	19,4	33,0

* Азот в соответствующих вариантах опыта вносился в форме NH_4NO_3.

минеральной смеси без азота давало незначительное повышение урожая, внесение на фоне этой смеси азота в форме аммиачной селитры, вследствие физиологической кислотности последней, оказывало отрицательное влияние. В то же время при нейтрализации вредной обменной кислотности внесение тех же доз суперфосфата и азота обеспечивало хорошее развитие и высокий урожай пшеницы и без внесения перегноя.

Коэффициент использования суперфосфата становится еще более высоким, когда он вносится местно, в непосредственной близости от высеваемых семян пшеницы. В этом случае в очаге почвы, где распространяются молодые корни растений, создается повышенная концентрация фосфатов, усиливается их поступление в молодые растения, когда потребность в фосфоре особенно велика.

В следующей таблице (5) приводятся результаты опытов с клевером.

Результаты этого опыта в основном совпадают с данными, полученными в опыте с яровой пшеницей. Тех небольших доз извести, которые вносятся в смеси с перегноем и суперфосфатом, конечно, оказалось совершенно недостаточно, чтобы преодолеть вредное влияние почвенной кислотности на клевер. Урожай клевера в этом случае был так же низок, как и без удобрения. Слабо развивались в этом случае и клубеньки на корнях клевера, и была низка их азотфиксирующая способность. Нормальные условия для роста клевера и для биологического синтеза азота клубеньковыми бактериями создавались только при нейтрализации вредной обменной кислотности.



Рис. 2. Развитие колосьев яровой пшеницы:
слева — по тройной смеси Т. Д. Лысенко: 6 кг перегноя, 1 г суперфосфата, 1 г извести + 0,6 г азота; *справа* — известь по $1^1/_2$ обменной кислотности, 1 г суперфосфата и 0,6 г азота.

Таким образом, в основу всех мероприятий по устранению вредного влияния кислой реакции почв, в основу всех приемов применения удобрений должно быть положено создание наиболее благоприятных условий питания непосредственно для самих растений, а не для развития почвенных микроорганизмов, которые якобы питают культурные растения.

Недостатки системы удобрения, рекомендуемой Т. Д. Лысенко, обусловлены тем, что она построена из расчета на создание в первую очередь благоприятных условий для развития почвенных микроорганизмов. Именно это заставляет производить требующее значительных трудовых затрат и в наиболее напряженные для сельского хозяйства периоды (в посевную

Таблица 5

Вариант опыта	Урожай сухого вещества клевера, г		Сырой вес клубеньков, г	% азота в надземной массе клевера
	надземная масса	корни		
1. Без удобрений	6,2	8,1	0,15	1,61
2. Смесь — 6 г перегноя, 1 г суперфосфата и 1 г извести	6,8	7,6	0,35	1,70
3. 8 г извести + 1 г суперфосфата	22,9	14,4	2,10	2,88
4. То же + 6 г перегноя	24,4	16,9	2,0	2,79
5. 8 г извести + 0,5 г суперфосфата местно	23,4	14,3	2,0	2,78
6. То же, что в варианте 5, + 0,5 г суперфосфата в нижний слой почвы	26,8	24,2	2,52	2,79

кампанию) смешение суперфосфата и извести с навозом, перегноем или торфом, хотя никто еще не доказал, что внесение этой смеси дает лучший результат, чем раздельное внесение составляющих ее компонентов. Именно потому, что эта система рассчитана на улучшение развития почвенных микроорганизмов, она дает неправильное решение вопроса об устранении вредного влияния на растения кислотности почв. Наконец, полноценность использования фосфорных удобрений в этой системе будет значительно ниже, чем при применении других способов их внесения, рассчитанных на непосредственное усиление фосфорного питания самих растений.

В последние годы в нашей стране получает все большее распространение удобрение зерновых небольшими дозами гра-

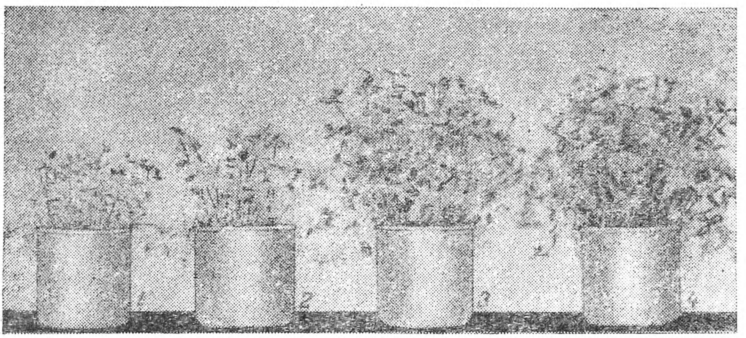


Рис. 3. Клевер в вегетационных опытах на кислой подзолистой почве:
1 — без удобрений; *2* — тройная смесь по Т. Д. Лысенко: 6 г перегноя, 1 г суперфосфата, 1 г извести; *3* — известь по $1^1/_2$ обменной кислотности и 1 г суперфосфата; *4* — известь по $1^1/_2$ обменной кислотности и 0,5 г суперфосфата местно.

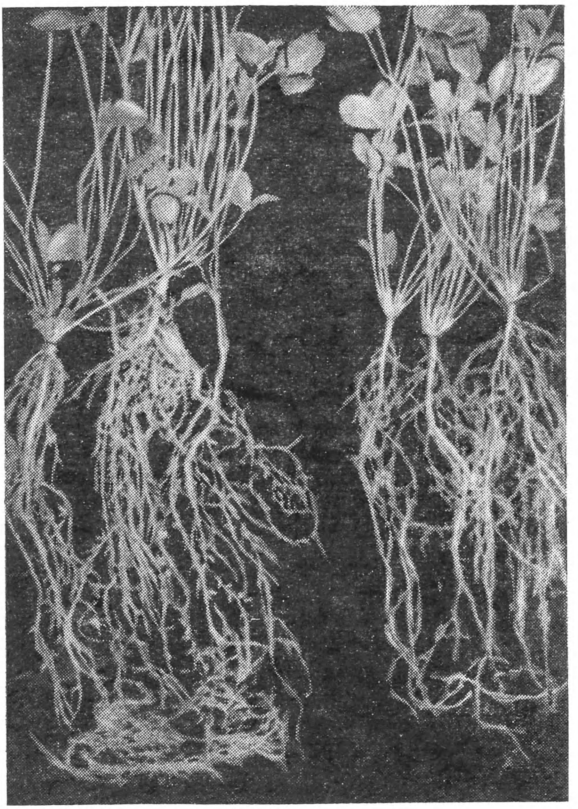


Рис. 4. Развитие корневой системы и клубеньков клевера:

слева — известь по $1^1/_2$ обменной кислотности и 1 г суперфосфата; *справа* — тройная смесь по Т. Д. Лысенко: 6 г перегноя, 1 г суперфосфата и 1 г извести.

нулированного суперфосфата, вносимого в рядки вместе с семенами обычной зерновой сеялкой. Этот прием является весьма эффективным.

Полевые опыты и точные лабораторные исследования с применением меченых атомов установили, что в этом случае внесенные фосфорные удобрения чрезвычайно интенсивно используются растениями.

В производственных опытах Долгопрудной агрохимической опытной станции в 1952 г. в колхозе им. Жданова Краснополянского района Московской области в среднем для четырех опытов на площади в 1,4; 1,45; 9,0 и 10 га были получены такие результаты от внесения в рядки с семенами пшеницы 10 кг

P_2O_5 гранулированного двойного суперфосфата с различным размером гранул *.

Гранулы 1—2 мм	Урожай зерна пшеницы, ц/га	Прибавка от удобрения, ц/га
Контроль	13,7	—
10 кг P_2O_5 гранулы 1—2 мм	20,3	6,6
10 „ „ „ 1—4 „	20,2	6,5
10 „ „ „ 2—4 „	21,5	7,8

Таким образом, 10 кг P_2O_5, что в пересчете на простой гранулированный суперфосфат составляет 0,5 ц в натуре, давали прибавку урожая зерна в 6—7 ц. Прибавка же от всей смеси удобрений в опытах в Горках-Ленинских, куда входит 3 ц суперфосфата, 3 ц извести и 1,8 т перегноя, составляла 10,9 ц. Если условно принять всю эту прибавку за счет 3 ц суперфосфата, то и тогда выходит, что оплата 1 ц суперфосфата в этом случае составляет всего около 3,6 ц зерна. В производственных же опытах с рядковым внесением малых доз суперфосфата оплата 1 ц суперфосфата составляет 12—14 ц.

Наиболее эффективным приемом использования азотных удобрений для озимых зерновых культур является ранняя весенняя их подкормка небольшими дозами азота (20 кг).

Сочетание небольших доз суперфосфата при рядковом его внесении с семенами и ранней весенней подкормки озимых зерновых обеспечит значительное повышение урожайности этих культур в нашей стране уже в самое ближайшее время при сравнительно небольших затратах удобрений. В производственных опытах Долгопрудной агрохимической опытной станции, проводившихся систематически в течение 1948—1953 гг. в колхозе им. Жданова, проверялась эффективность этих приемов удобрения зерновых на большей части посевной их площади. В результате амбарный урожай со всей площади (удобренной и неудобренной) зерновых культур, который за все предшествующие до проведения опытов годы был не выше средних урожаев по району, в 1948—1952 гг. (т. е. в годы, когда минеральные удобрения стали применяться на значительной части площадей зерновых культур) превысил среднерайонные урожаи в среднем за четыре года на 6,3 ц/га (см. «Московский колхозник», 1954, № 3).

Таким образом, при современном уровне снабжения сельского хозяйства минеральными удобрениями более целесообразно внедрять в практику местное внесение небольших доз суперфосфата в рядки или в лунки и внесение небольших доз

* Опыты проведены под руководством кандидата с.-х. наук Д. Г. Грачева.

азота в подкормку. Местное рядковое внесение небольших доз суперфосфата позволит удобрить в 5—6 раз большую площадь зерновых, чем при затрате тех же количеств суперфосфата, используемого в качестве компонента органо-минеральной смеси по системе Т. Д. Лысенко.

В соответствии с более высокой оплатой малых доз суперфосфата общий народнохозяйственный эффект от такого использования его будет намного больше, чем при использовании таких же количеств по системе Т. Д. Лысенко. Приготовление компостов является важнейшим мероприятием, позволяющим получить ценные дополнительные ресурсы удобрений. Но приготовлять хорошие компосты можно и без суперфосфата. Пускать же фосфат на изготовление компостов — это значит отказаться от таких эффективных приемов использования суперфосфата, как рядковое его внесение.

При более высоком уровне снабжения удобрениями целесообразно такое использование удобрений, которое предусматривает создание лучших условий питания растений как путем внесения малых доз удобрений в рядки или в лунки при посеве для усиления первоначального развития растений, так и путем внесения в предпосевную обработку и в подкормку соответствующих количеств удобрений для обеспечения питания растений на более длительный период.

Использование этих приемов применения удобрений под озимую пшеницу в производственных опытах, проведенных Долгопрудной агрохимической опытной станцией на сортоучастке колхоза им. Жданова (Московская область), давала более высокие прибавки урожая пшеницы, чем использование тех же доз минеральных удобрений и сверх того еще и перегноя по системе Т. Д. Лысенко в Горках-Ленинских (табл. 6).

Решениями сентябрьского и февральско-мартовского Пленумов ЦК КПСС приняты и уже осуществляются мероприятия по новому мощному подъему сельского хозяйства, по увеличению производства зерна, картофеля, овощей, продукции технических и других сельскохозяйственных культур. Для повышения урожайности, помимо других мероприятий, будет в несколько раз увеличено производство минеральных удобрений. Долг советских агрохимиков, агрономов, почвоведов, физиологов разработать наиболее эффективные приемы использования удобрений для всех районов и сельскохозяйственных культур нашей страны.

Разнообразие условий, в которых происходит применение удобрений, не позволяет давать единые решения для всего Союза.

Общими являются только методы подхода к решению этих вопросов. В основе всех приемов применения удобрений должны лежать правильные представления о процессах, происходящих в почве и в растении при внесении удобрений, и точный опыт,

Таблица 6

Результаты производственных опытов Долгопрудной агрохимической опытной станции НИУИФ с озимой пшеницей на сортоучастке колхоза им. Жданова (площадь под опытом — 6,3 га*)

Удобрения	Урожай зерна пшеницы и прибавка от удобрений, ц/га			
	сорт № 599		сорт № 1	
	урожай	прибавка от удобрений	урожай	прибавка от удобрений
1. Контроль	13,9	—	15,4	
2. 10 кг P_2O_5 суперфосфата в рядки, 30 кг N весной в подкормку	19,9	6,0	25,7	10,3
3. То же + 50 кг P_2O_5 суперфосфата и 60 кг K_2O в KCl с осени под вспашку	25,9	12,0	30,1	14,7
4. То же, что в варианте 3 + 30 кг азота осенью под борону	28,5	14,6	35,4	20,0

* Опыт проведен канд. с.-х. наук Д. Г. Грачевым и научным сотрудником В. И. Соколовой.

имеющий все необходимые варианты, чтобы выводы его были в достаточной степени достоверны.

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОМ АССОРТИМЕНТЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ*

Широкое применение минеральных удобрений под посевы технических культур в нашей стране явилось решающим фактором в получении хороших и все возрастающих урожаев этих культур. Так, урожай хлопка-сырца в Средней Азии в течение долгого времени до широкого применения минеральных удобрений составлял всего 7—8 ц/га. С ростом применения удобрений урожай хлопка непрерывно возрастал, и за последние годы, когда на каждый гектар хлопкового поля вносилось около 8—9 ц минеральных удобрений, урожай хлопка-сырца составлял в среднем по всем хлопковым районам СССР 20—21 ц/га.

Имеются все основания считать, что из этих 20—21 ц по крайней мере 10 ц получено за счет минеральных удобрений.

Еще более резко зависимость урожайности от интенсивности применения удобрений сказалась на чайных насаждениях в Закавказье, где сбор чайного листа с 500—600 кг возрос при широком использовании минеральных удобрений в среднем до 3500 кг/га. Огромное значение минеральные удобрения приоб-

* Статья опубликована в книге: «Минеральные удобрения и гербициды». НИУИФ, М., 1961.

рели и в свекловичных районах Украины и центральных черноземных областей. Получение урожаев сахарной свеклы в этих районах за последние годы в 190—200 ц в среднем с гектара стало возможным только благодаря использованию минеральных удобрений, за счет которых из указанного урожая сахарной свеклы следует отнести по меньшей мере 80 ц.

Если посевы основных технических культур в настоящее время в достаточной мере снабжаются минеральными удобрениями, то зерновые и кормовые культуры, занимающие более $^3/_4$ всей посевной площади СССР, получают очень мало удобрений. В соответствии с данными Министерства сельского хозяйства СССР на долю зерновых культур, включая все посевы кукурузы, приходится около 20% от общего потребления удобрений в СССР. Это составляет всего лишь 2,5 кг питательных элементов в среднем на гектар посевной площади зерновых культур. К тому же львиная доля из указанного количества удобрений под зерновые приходится на фосфоритную муку и калийные удобрения, применение которых без азота не всегда дает удовлетворительные результаты.

Огромная роль минеральных удобрений в повышении урожайности и в конечном счете в повышении продуктивности земледелия, в создании изобилия сельскохозяйственной продукции вызывает необходимость резкого увеличения производства минеральных удобрений. В сельском хозяйстве СССР при огромных размерах его посевных площадей можно было бы весьма эффективно использовать такие количества минеральных удобрений, которые по своим масштабам были бы близки к современному уровню мирового потребления удобрений.

Потребность в удобрениях отдельных районов СССР неодинакова. Она определяется как биологическими особенностями растений и агротехническими условиями их возделывания, так и почвенными и климатическими условиями произрастания растений. С известным приближением территорию СССР по степени отзывчивости на отдельные виды минеральных удобрений можно подразделить на следующие крупные районы:

1. Районы орошаемого земледелия Средней Азии, Южного Казахстана и Закавказья. Главной культурой, возделываемой в этих районах, является хлопчатник, под который и теперь вносятся в больших количествах азотные и фосфорные удобрения. Наиболее велика в этих районах потребность в азотных удобрениях, при правильном использовании которых достигается исключительно высокий эффект: 1 т азота, внесенного под хлопчатник, в этих условиях окупается в зависимости от состояния агротехники и водоснабжения от 10 до 15 т хлопка-сырца.

Потребность в фосфорных удобрениях в этих районах также весьма значительна. Особенно высокий эффект дает при-

менение фосфатов при совместном их использовании с азотными удобрениями на перегнойно-карбонатных и лугово-болотных почвах.

Потребность в калийных удобрениях обычно сравнительно слабо выражена вследствие высокой обеспеченности почв этих (карбонатные сероземы) собственными запасами усвояемого калия. Но при длительном интенсивном применении азотных и фосфорных удобрений, обеспечивающих систематическое получение высоких урожаев хлопка, происходит обеднение почв усвояемым калием вследствие усиленного выноса калия с высокими урожаями хлопка. Поэтому уже теперь во многих районах Средней Азии для получения высоких урожаев необходимо вносить калийные удобрения. Не вызывает сомнений, что в дальнейшем потребность в калийных удобрениях в хлопковых орошаемых районах будет из года в год возрастать.

2. Субтропические районы Закавказья — основные районы возделывания чая, цитрусовых и других субтропических культур. Благоприятные климатические условия (большое количество осадков, тепло) и бедность почв основными питательными элементами обусловливают высокое действие минеральных удобрений в этом районе. Особенно велика здесь потребность в азотных удобрениях, усугубляющаяся сильной вымываемостью легкоподвижных азотных соединений из почв ливневыми осадками.

3. Районы нечерноземной зоны, занимающие в пределах европейской части СССР огромную территорию (центральная нечерноземная зона, север и северо-запад РСФСР, северная часть Урала, БССР, Прибалтика, северные и западные районы Украины), включающую более 45 млн. га посевов различных сельскохозяйственных культур, характеризуются исключительно высокой потребностью в удобрениях. Наличие достаточного количества влаги в этой зоне создает весьма благоприятные условия для эффективного использования минеральных удобрений.

В этой зоне высокий эффект дает применение всех видов удобрений — азотных, фосфорных, калийных. Здесь же обычно проявляется потребность и в микроудобрениях — борных, медных, кобальтовых, молибденовых. Но из всех видов удобрений ведущее положение в этой зоне занимают азотные удобрения, при использовании которых эффективность применения фосфорных и калийных удобрений становится более высокой. Все культуры, возделываемые в этой зоне, весьма высоко окупают применение минеральных удобрений.

В настоящее время в районах нечерноземной зоны получают низкие урожаи зерновых культур, и удельный вес этой зоны в обеспечении нашей страны продукцией зерна невелик.

Точные опыты, проведенные различными исследовательскими институтами и сельскохозяйственными станциями, так

же как и практика ряда колхозов и совхозов, показывают, что при использовании нормальных доз азотных, фосфорных и калийных удобрений под зерновые культуры средние урожаи их (пшеницы, ржи, овса) за ряд лет в нечерноземной зоне составляют около 27—30 ц зерна, т. е. примерно такие же урожаи, как и в ряде западноевропейских стран, широко применяющих минеральные удобрения.

При достаточной обеспеченности минеральными и прежде всего азотными удобрениями и при проведении полевых работ на должном агротехническом уровне нечерноземная зона станет одной из основных житниц нашей страны, так как получение высоких урожаев в этих районах, как правило, не лимитируется недостатком влаги — осадков здесь достаточно и сильных засух не бывает.

4. Влажные районы центральной черноземной зоны (северная и западная ее части) — области Орловская, Курская, Белгородская, часть Тамбовской и Воронежской и районы основной свеклосеющей зоны Украины.

В настоящее время в этой зоне минеральные удобрения используются главным образом под посевы сахарной свеклы. Применение минеральных удобрений дает высокий эффект и на других культурах — зерновых, картофеле, овощных и кормовых.

В этой зоне в равной степени эффективны азотные и фосфорные удобрения. При внесении азота и фосфора значительный эффект дают также и калийные удобрения. Потребность в последних особенно проявляется в свекловичных севооборотах в результате усиленного выноса калия с урожаями сахарной свеклы.

При применении нормальных доз удобрений и правильной агротехнике в этой зоне могут быть получены урожаи в среднем около 250—300 ц сахарной свеклы, 25—30 ц зерновых на гектар и соответствующие этому уровню высокие урожаи других сельскохозяйственных культур. Такой уровень урожайности будет достаточно устойчив по отдельным годам, так как засухи в этой зоне бывают редко и только в восточной ее части.

В общем же в районах европейской части нечерноземной зоны и во влажной части черноземной зоны — в районах, расположенных в наиболее густонаселенной центральной, западной и юго-западной частях нашей страны, при достаточном снабжении минеральными удобрениями можно рассчитывать на получение в 2—3 раза большего количества сельскохозяйственной продукции, чем мы имеем в настоящее время в этих районах. На территории этих районов возделывается около 40 млн. га зерновых культур. Наличие достаточных количеств удобрений позволит получить здесь во всяком случае в среднем не менее 25—27 ц зерна на гектар, что для всей площади зерновых в этих районах даст общий сбор зерна 100—

110 млн. т (6—6,5 млрд. пудов), хотя площадь зерновых в этом районе составляет менее $^1/_3$ от общей площади зерновых культур в СССР. На территории этих районов (нечерноземная зона и влажная часть черноземной зоны) размещены основные массивы картофеля, под посевами которого здесь занято около 7 млн. га.

В соответствии с результатами многочисленных опытов применение нормальных доз минеральных удобрений под картофель в этих районах позволит довести урожайность ее в среднем до 200—240 ц/га.

В районах нечерноземной зоны и влажной части черноземной зоны расположены обширные луговые угодья, производительность которых при применении минеральных удобрений резко повышается. Во многих западноевропейских странах и в США в настоящее время минеральные удобрения в весьма широких размерах используются на лугах и пастбищах. При этом если в прежние времена обычно на луга вносились более дешевые калийные и фосфорные удобрения, то теперь, кроме фосфорных и калийных, широко используются и азотные удобрения, применение которых особенно выгодно.

У нас до последнего времени удобрения на луга в широкой практике не использовались, хотя проведенные опыты показывают исключительно высокую окупаемость применяемых удобрений урожаем сена.

Создание мощной кормовой базы путем интенсивного применения минеральных удобрений на естественных лугах будет иметь также весьма большое значение в районах нечерноземной и влажной части черноземной зоны, т. е. в центральных районах нашей страны, где развитие высокопродуктивного молочного животноводства особенно важно.

5. Восточная Сибирь, Дальний Восток и влажная часть Западной Сибири.

В районах Восточной Сибири и Дальнего Востока наиболее распространены подзолистые почвы, на которых, как правило, применение азотных, фосфорных и калийных удобрений является весьма эффективным. В широких производственных испытаниях по применению аммиачной воды, проведенных в 1957 г. в Иркутской области на площадях в несколько тысяч гектаров, прибавки урожая зерна пшеницы от средних доз азота в аммиачной воде обычно выражались величиной, близкой к 10 ц/га.

В связи с интенсивным индустриальным развитием этих районов и быстрорастущим населением становится необходимым усилие продовольственной базы в этих районах путем широкого использования минеральных удобрений.

6. Степные районы Украины, Северный Кавказ, Западная Сибирь, Среднее Поволжье.

На большей части территории этих районов, представленных обыкновенными и мощными черноземами и отчасти каштановыми почвами, часто в минимуме является влага, и получение хороших урожаев в первую очередь достигается мероприятиями по накоплению и сохранению влаги в почве. Из отдельных видов удобрений главная роль здесь должна быть отведена фосфатам, особенно таким приемам их рационального использования, как внесение небольших доз гранулированного простого или двойного суперфосфата в рядки или гнезда. Потребность в азоте и калии вследствие высоких запасов этих элементов в богатых черноземах и при недостаточной обеспеченности влагой проявляется слабее.

Азотные удобрения в этих районах могут эффективно использоваться главным образом под овощные культуры и картофель, которые обычно возделываются на более обеспеченных влагой участках, а также под другие культуры в приречных и приморских районах и, наконец, в горных районах Северного Кавказа и Западной Сибири, где обычно и почвы беднее (подзолы, горнолуговые и буроземы) и климат влажнее.

7. Южный Урал, Нижнее Поволжье, Казахстан (без хлопковых районов).

Основным приемом удобрения в этих сухих зерновых районах должно явиться применение небольших доз (10 кг P_2O_5) гранулированного простого или двойного суперфосфата в рядки при посеве зерновых. Применение азотных и калийных удобрений может оказаться целесообразным только в отдельных случаях на более бедных почвах и при достаточном количестве осадков. На основной же части территории этих районов потребность в азотных и калийных удобрениях ограничена.

Если применять минеральные удобрения в обычных, нормальных дозах во всех районах СССР, где внесение удобрений дает достаточно ощутимые результаты, то для этого при современных размерах посевных площадей сельскохозяйственных культур в нашей стране потребуется примерно 5,1 млн. т N, 7,0 млн. т P_2O_5 и 5,1 млн. т K_2O, что в сумме, в пересчете на принятые у нас стандартные единицы туков, составит около 35 млн. т (табл. 1).

Достижение такого уровня производства минеральных удобрений должно явиться одной из главнейших задач нашей химической промышленности в ее перспективном развитии.

При столь высокой потенциальной потребности сельского хозяйства нашей страны в минеральных удобрениях становится весьма необходимым ускорение темпов строительства новых заводов, с тем чтобы уже в ближайшие годы производство могло бы обеспечить районы и культуры с наиболее острой нуждаемостью в удобрениях.

Так как основные технические культуры обеспечиваются удобрениями в более или менее достаточных количествах уже

в настоящее время, то очевидно, что всякое дальнейшее увеличение производства минеральных удобрений будет иметь наибольшее значение прежде всего для повышения урожайности продовольственных и кормовых культур.

При современных размерах посевных площадей потребность основных технических культур СССР в минеральных удобрениях при использовании их в нормальных дозах составляет в тыс. т питательных элементов: азот (N) — 570, фосфор (P_2O_5) — 530, калий (K_2O) — 370; всего в пересчете на условные стандартные туки — 6,5 млн. т.

Если в ближайшие годы общее производство минеральных удобрений в СССР достигнет почти 35 млн. т (в пересчете на стандартные туки), то в этом случае окажется возможным почти 30 млн. т удобрений использовать на посевах зерновых культур, что, конечно, будет иметь огромное значение для увеличения продукции этих культур.

При дальнейшем расширении объема производства минеральных удобрений возникает также необходимость и значительного расширения их ассортимента за счет новых видов и форм удобрений, производство которых целесообразно как по агрономическим соображениям, так и с точки зрения комплексного использования сырьевых и энергетических ресурсов и развития более совершенных технологических методов производства.

Огромная роль азотных удобрений в повышении продуктивности земледелия обусловливает необходимость самого интенсивного строительства новых заводов азотных удобрений и расширения их производства там, где это возможно, на действующих заводах. В связи с тем что производство жидких азотных удобрений — жидкого или водного аммиака — требует на единицу вырабатываемого азота значительно меньших затрат и может быть организовано в более быстрые сроки, становится возможным широкое использование жидких азотных удобрений в сельском хозяйстве нашей страны при одновременном оснащении его машинами для внесения в почву и тарой для транспорта и хранения этих видов удобрений.

Преимуществом жидких азотных удобрений, помимо того, что они дешевле, является также и то, что все работы с жидкими удобрениями от начала до конца полностью механизированы, что дает значительную экономию в затратах труда на применение удобрений.

Проводившиеся в СССР в 1956 и 1957 гг. широкие производственные испытания применения жидких азотных удобрений дали хорошие результаты и подтвердили возможность эффективного использования этих удобрений в сельском хозяйстве нашей страны. Особенно широко могут использоваться жидкие азотные удобрения в хлопковых районах Средней Азии и Закавказья, где около 30% от всего количества азота может быть дано в виде жидких азотных удобрений. Значительные количе-

ства жидких азотных удобрений могут быть использованы в основных свеклосеющих районах, а также под овощные культуры, картофель, кукурузу и яровые зерновые в нечерноземной зоне.

Необходимо отметить, что существующие машины для внесения жидких удобрений с широкой расстановкой сошников наиболее приспособлены для внесения жидких удобрений в подкормку под широкорядные культуры. При внесении жидких азотных удобрений они в основной массе локализуются в узких полосах шириной 5—7 см, расположенных по линии прохождения сошников, через которые происходит подача жидкого удобрения в почву, а в промежутках между сошниками почва остается неудобренной.

В качестве примера можно привести следующие данные из опытов, проводившихся на Долгопрудной агрохимической опытной станции.

Такое локальное размещение жидких азотных удобрений в почве не влияет на их эффективность при внесении в междурядную подкормку под пропашные культуры. В этом случае все растения находятся на одинаковом отдалении от внесенного в междурядья удобрения, и последнее достаточно равномерно используется всеми растениями. Но при сплошном травостое, как, например, в посевах зерновых культур, такая локализация размещения жидких удобрений вызывает значительную пестроту в урожае, так как сосредоточенное в узких полосках почвы азотное удобрение прежде всего используется теми растениями, которые находятся вблизи от этих полос.

В опытах с овсом на Долгопрудной агрохимической опытной станции растения, находящиеся вблизи линии прохождения удобряющих сошников, резко отличались по их мощному развитию от растений, более удаленных от этой линии (табл. 2).

То же самое имело место и в производственных опытах с применением жидкого аммиака и аммиачной воды под зерновые культуры. Для избежания такой пестроты необходимо, чтобы в машине для внесения жидких удобрений под зерновые и другие растения сплошного травостоя расстояния между удобряющими сошниками были бы возможно меньшими — не более 20—25 см.

Удельный вес жидких азотных удобрений — жидкого и водного аммиака — в общем потреблении азотных удобрений может составить не менее 20%. В ассортименте жидких азотных удобрений, по-видимому, могут сосуществовать как жидкий, так и водный аммиак (аммиачная вода). Преимуществом первого является его высокая концентрация (82,5% N). Но обращение в сельском хозяйстве с аммиачной водой вследствие низкой упругости ее пара представляет значительные удобства в сравнении с жидким аммиаком. Кроме того, машины для внесения и тара для аммиачной воды будут значительно проще и потребуют меньшего расхода металла, чем для жидкого ам-

Таблица 1

Размещение удобрений по основным районам СССР при общем уровне их потребления около 35 млн. т

Районы	Общее потребление питательных элементов, тыс. т			Потребление питательных элементов в среднем на гектар всей посевной площади района, кг		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Нечерноземная зона европейской части СССР	850	1550	1600	21	39	40
УССР и центральная черноземная зона	500	800	400	10	16	8
Поволжье и Северный Кавказ	100	300	50	3	9	1,5
Южный Урал и зерновые районы Казахстана	50	250	15	1,5	6	0,4
Западная Сибирь	75	250	35	3,5	11	1,7
Восточная Сибирь и Дальневосточные районы	100	150	75	12	18	8
Средняя Азия и хлопковые районы Казахстана	400	300	100	73	55	18
Закавказье	90	70	50	33	55	20
	2105	3570	2325	10	18	11

Таблица 2

Распределение в почве жидкого аммиака в слое 0—15 см при внесении его с помощью машины производства завода им. К. Готвальда

Доза N 40 кг/га		Доза N 80 кг/га		
в пунктах прохождения сошника машины	5 см в сторону от сошника	в пунктах прохождения сошника машины	5 см в сторону от сошника	10 см в сторону от сошника
мг/кг почвы				
98,7	5,1	135,3	29,5	3,6
42,6	11,9	147,6	45,2	6,3
192,6	4,7	300,0	48,6	4,1
45,1	5,2	225,5	11,2	7,0
46,1	4,5	152,6	19,1	5,8
45,1	7,2	250,0	23,4	5,1
170,5	4,7	136,1	26,0	23,4
70,9	11,9	179,2	41,7	5,6
73,8	19,5	258,0	6,9	3,2
50,8	29,1	114,0	50,8	24,7

миака. В известных случаях, возможно, окажется целесообразной доставка в центры потребления жидкого аммиака с последующей его переработкой на специальных установках в аммиачную воду для непосредственного внесения.

Для основных районов Украины, центральной черноземной зоны, Сибири, орошаемых районов Средней Азии и Закавказья и для других районов, почвенный покров которых представлен черноземами, каштановыми почвами, сероземами и вообще почвами, насыщенными основаниями, аммиачная селитра является главным видом азотного удобрения, применение которой на этих почвах, как правило, дает не худший эффект, чем любая другая форма азотного удобрения. На этих же почвах с большим успехом будет использован и сульфат аммония, который получается в больших количествах в коксохимии и как отход от некоторых органических производств.

Однако для районов нечерноземной зоны, где преобладают дерново-подзолистые почвы, характеризующиеся кислой реакцией, аммиачная селитра вследствие ее потенциальной кислотности не является оптимальной формой азотного удобрения. Систематическое применение аммиачной селитры в этих условиях будет сопряжено с дальнейшим подкислением почвы и ухудшением ее агрономических свойств, что неизбежно будет значительно снижать эффективность применения удобрений. При известковании этих почв применение аммиачной селитры и других кислых форм азотных удобрений ускорит декальцинацию этих почв и тем самым значительно сократит продолжительность действия извести.

Таким образом, даже при известковании подзолистых почв применение некислых форм азотных удобрений на этих почвах является желательным, хотя и менее необходимым, чем на неизвесткованных подзолистых почвах. По этой причине в западных странах, где известкование почвы проводится в широких масштабах, в ассортименте азотных удобрений все же преобладают нейтральные и щелочные формы (известково-аммиачная селитра, кальциевая селитра). Учитывая, что в ближайшие годы уровень потребления азотных удобрений в нечерноземной зоне будет непрерывно возрастать, целесообразно даже при осуществлении намеченных Министерством сельского хозяйства СССР мероприятий по известкованию почв значительную часть аммиачной селитры, размещаемой в нечерноземной зоне, выпускать в нейтрализованном виде. При этом в качестве такого нейтрального удобрения целесообразно производить не обычную известково-аммиачную селитру, а гранулированный сплав аммиачной селитры с доломитом — доломитово-аммиачную селитру.

В нечерноземной зоне весьма распространены легкие песчаные и супесчаные почвы, занимающие примерно $^1/_3$ от всей территории нечерноземной зоны. Проведенные за последние годы опыты показывают, что на этих почвах проявляется потребность в магниевых удобрениях. Поэтому доломитово-аммиачная селитра как магнийсодержащее удобрение будет иметь значительное преимущество перед обычной аммиачной селитрой, что

можно видеть из следующих данных полевых опытов, проведенных на легкой подзолистой супесчаной почве Люберецкого опытного поля НИУИФ (табл. 3).

Таблица 3

Прибавка от азота, ц/га

Культура	Обычная аммиачная селитра	Нейтрализованная доломитом аммиачная селитра
Рожь (зерно)	4,9	6,0
Картофель	99	129
Кормовая свекла	70	148
Просо (зерно)	7,5	12,2

Из всех «твердых» видов азотных удобрений наиболее концентрированным является мочевина, содержащая около 46% азота. Гранулированная мочевина обладает также более высокими физико-механическими качествами, чем аммиачная селитра, и, кроме того, она имеет значительное преимущество перед всеми другими формами азотных удобрений при использовании ее для внекорневой подкормки, в особенности плодово-ягодных и овощных культур. Достигнутый в последнее время прогресс в синтезе мочевины позволит снабжать сельское хозяйство этим видом удобрения по ценам, близким к стоимости аммиачной селитры (считая на единицу азота), что открывает широкие перспективы для развития производства и потребления мочевины на удобрение. Мочевина может найти также широкое применение в животноводстве как азотистая добавка к кормовым рационам.

Как известно, азотные удобрения отличаются весьма высокой подвижностью. Это приводит к значительному вымыванию азота из корнеобитаемого слоя почвы в районах с обильными осадками, в частности в субтропических районах Закавказья. В районах же с сухим климатом азотные удобрения выносятся с восходящими токами влаги в иссушенный поверхностный слой почвы. Поэтому возникает необходимость в создании такого типа азотного удобрения, азот которого обладал бы ограниченной подвижностью, но вместе с тем легко усваивался растениями, как, например, фосфор в преципитате.

В настоящее время как в СССР, так и за рубежом синтезированы труднорастворимые азотные удобрения путем совместной полимеризации мочевины и формальдегида. Получаемые при этом препараты — уреаформ или карбамидформ — пока что не вошли в широкую сельскохозяйственную практику. В последние годы достигнуты значительные успехи в разработке методов получения труднорастворимых азотных удобрений. Опыты, проведенные В. И. Соколовой на Долгопрудной агро-

химической опытной станции НИУИФ, по изучению целого ряда препаратов труднорастворимых азотных удобрений, полученных путем конденсации мочевины с формальдегидом, показали, что некоторые из этих препаратов, в частности препараты, полученные при невысокой температуре конденсации, характеризуются весьма высокой усвояемостью содержащегося в них нерастворимого азота. Это позволяет считать, что в ближайшее время можно будет рассчитывать на достаточно значительное внедрение в сельское хозяйство нашей страны новых нерастворимых, но высокоусвояемых азотных удобрений.

Необходимость повышения удельного веса концентрированных удобрений в общей их продукции наиболее актуальна для фосфатов, так как основной вид фосфорного удобрения в настоящее время — суперфосфат — почти в 2 раза менее концентрирован, чем аммиачная селитра — главный вид азотного удобрения. Следует учитывать также и то обстоятельство, что фосфорные удобрения в значительно большей мере, чем другие удобрения, будут размещаться в зерновых районах Казахстана и Сибири и других районах, удаленных от центров производства удобрений на большие расстояния.

Поэтому целесообразно, чтобы на новых фосфатнотуковых заводах, и прежде всего на заводах, продукция которых будет размещаться в отдаленных районах, производились концентрированные фосфаты. Таковым является двойной суперфосфат, выпускаемый в гранулированном виде с содержанием 45—50% P_2O_5. Двойной суперфосфат вместе с тем является наиболее универсальным видом фосфорного удобрения, пригодным для всех почв и для всех приемов использования под любые сельскохозяйственные растения. Проведенные в последние годы опыты показали, что двойной суперфосфат является весьма пригодным и для внесения его в небольших дозах (10 кг P_2O_5 — около 25 кг удобрения в натуре) в рядки под зерновые культуры.

Из других концентрированных удобрений весьма целесообразно производство аммофоса. Вследствие высокой подвижности в почве аммофос является наиболее пригодным источником фосфора для подкормок, и для этих целей он значительно превосходит по своей эффективности другие формы фосфатов. Но и при использовании для основного внесения на черноземах и особенно на сероземах аммофос часто имеет преимущество перед суперфосфатом. Так, в опытах, проведенных в 1952—1956 гг. на среднеазиатских опытных станциях (Пахта-Арал, ЦСУА, Ферганская опытная станция), прибавка урожая хлопка-сырца от гранулированного суперфосфата в среднем составляла 3,1 ц/га, а от P_2O_5 аммофоса — 5,1 ц/га. Преимущество аммофоса перед суперфосфатом было и в длительных опытах ЦСУА и Таджикской опытной станции. Таким образом, для районов черноземных почв Украины, центральной черноземной зоны и

карбонатных почв Средней Азии аммофос является одним из наиболее перспективных форм удобрений, и широкое производство его в этих районах весьма целесообразно.

Примечание. Многие положения Ф. В. Турчина, высказанные им 70 лет назад, получили осуществление в разработанном в настоящее время ассортименте удобрений. К ним относится производство в больших масштабах мочевины, аммофоса, нитрофоски, двойного суперфосфата (Химия сельского хозяйства. В кн.: «Статистика народного хозяйства СССР». М., 1969). На очереди стоит вопрос о производстве жидких азотных удобрений, термических фосфатов и сульфата калия.

Кроме двойного суперфосфата и аммофоса, в сельском хозяйстве нашей страны могут найти широкое применение и другие концентраты — диаммофос, преципитат, а также водорастворимые метафосфаты, если производство последних окажется целесообразным по технико-экономическим соображениям.

Термические фосфаты наиболее целесообразно могут быть использованы на кислых почвах нечерноземной полосы, где обесфторенные и плавленые магнезиальные фосфаты вследствие щелочной их реакций и меньшей ретроградации в почве имеют преимущество перед суперфосфатом при допосевном, разбросном внесении удобрений. При этом особенно целесообразным является производство плавленого магнезиального фосфата для тех районов, где распространены бедные магнием легкие песчаные и супесчаные почвы и где поэтому плавленый магнезиальный фосфат может служить одновременно и фосфорным и магниевым удобрением.

В опытах на песчаных и супесчаных почвах, проведенных на Люберецком опытном поле и в географической сети НИУИФ, урожай таких культур, как картофель, свекла, рожь, при применении плавленого магниевого фосфата был на 15—20% выше, чем при применении суперфосфата.

Обесфторенные фосфаты могут быть эффективно использованы для основного внесения также и на оподзоленных черноземах в северной части Украины и центральной черноземной зоны.

К группе термических фосфатов относятся и металлургические фосфатшлаки—томасшлаки и мартеновские фосфорсодержащие шлаки, получаемые в качестве побочного продукта при производстве стали. Эти удобрения наиболее целесообразно использовать в районах кислых почв нечерноземной полосы и красноземов Закавказья. Но так как точки производства металлургических фосфатшлаков могут находиться на значительном отдалении от указанных районов, то это все же не исключает возможности их использования на нейтральных почвах в районах, прилегающих к металлургическим заводам, где в качестве отходов могут получаться фосфатные шлаки.

Несколько пониженная эффективность единицы P_2O_5 в фосфатшлаках в сравнении с суперфосфатом в этих условиях мо-

жет быть компенсирована применением повышенных доз фосфатшлака. Поэтому целесообразно всемерное расширение производства фосфатшлака как побочного продукта на металлургических заводах, работающих на фосфорсодержащих железных рудах.

В настоящее время основным видом фосфорного удобрения в нашей стране является суперфосфат, значительная часть которого выпускается в гранулированном виде.

Гранулированный суперфосфат, обладающий высокими физическими качествами, более пригоден для механизированного внесения, лучше сохраняется и в конечном счете более полноценно используется в сельском хозяйстве, чем порошковидный суперфосфат. Но что особенно важно, — гранулированный суперфосфат имеет огромное преимущество перед простым суперфосфатом при внесении вместе с семенами в рядки, гнезда, лунки. Для этих весьма прогрессивных приемов использования удобрений простой суперфосфат вообще малопригоден. В силу указанных причин необходимо основную массу простого суперфосфата производить в гранулированном виде.

Следует сказать, что существующий стандарт на гранулированный суперфосфат, определяющий выпуск этого удобрения с размерами гранул от 2 до 4 мм, в этой части не является сколько-нибудь обоснованным. В процессе гранулирования суперфосфата первоначально около $^1/_3$ его веса получается с размерами частиц от 1 до 2 мм и, чтобы удовлетворить требования стандарта, приходится эту фракцию отсеивать и возвращать обратно в производственный цикл. Это увеличивает стоимость гранулированного суперфосфата и понижает производительность завода. Нижняя граница 2 мм для размера гранул суперфосфата была принята в свое время в связи с опасениями отдельных научных работников о возможно худшей высеваемости гранулированного суперфосфата, содержащего фракцию с размерами частиц от 1 до 2 мм, особенно в тех случаях, когда суперфосфат будет вноситься совместно с семенами в рядки обычной зерновой сеялкой. Проведенные широкие производственные испытания полностью опровергли это представление — во всех случаях гранулированный суперфосфат с размерами частиц от 1 до 4 мм для любых способов его внесения был не менее пригоден, чем суперфосфат с размерами частиц от 2 до 4 мм. Исследования же степени усвояемости растениями P_2O_5 суперфосфата, проведенные с применением P^{32} как в СССР (А. В. Соколов и его сотрудники в НИУИФ, П. А. Дмитренко в Украинском институте соц. земледелия), так и за рубежом, установили, что из более мелких гранул суперфосфата P_2O_5 усваивается растениями быстрее, чем из более крупных гранул.

Таким образом, снижение размера гранул суперфосфата до 1 мм вместо 2 мм в нижнем пределе не только не ухудшит, а,

наоборот, повысит удобрительную ценность гранулированного суперфосфата. Необходимость безотлагательного пересмотра стандарта на размер гранул суперфосфата совершенно очевидна.

Для улучшения физических свойств суперфосфата из фосфоритов Кара-Тау и повышения эффективности его применения целесообразно на суперфосфатных заводах Средней Азии, использующих кара-тауские фосфориты, выпускать аммонизированный суперфосфат, имеющий в условиях Средней Азии преимущество перед обычным и гранулированным суперфосфатом.

В опытах на Пахта-Аральской опытной станции в среднем за 4 года (1951—1954) прибавки от P_2O_5 гранулированного и аммонизированного суперфосфата составляли соответственно 4,7 и 7,2 ц/га хлопка-сырца, в опытах ЦСУА (1954—1956) — 5,2 ц хлопка-сырца от P_2O_5 гранулированного и 7,7 ц/га от аммонизированного суперфосфата.

Для аммонизации значительной части суперфосфата целесообразно применять аммиакаты с целью получения более обогащенного азотом удобрения.

На не насыщенных основаниями почвах нечерноземной зоны и северной части черноземной зоны в весьма больших количествах для основного предпосевного внесения под зерновые, кормовые и некоторые технические культуры может быть эффективно использована фосфоритная мука как дешевое удобрение, производство которого требует обычно значительно меньших капиталовложений в сравнении с суперфосфатом.

Однако если условия добычи фосфорита в тех или иных случаях будут сопряжены с большими капиталовложениями и стоимость фосфоритной муки будет приближаться к стоимости суперфосфата, то в этих случаях целесообразно вместо фосфоритной муки развивать производство суперфосфата как более универсального удобрения.

Хлористый калий как в настоящее время, так и впредь будет являться основным видом калийного удобрения для всех сельскохозяйственных растений, нечувствительных к наличию хлора в удобрениях. Необходимо, однако, провести мероприятия по улучшению физических качеств хлористого калия и прежде всего устранить его слеживаемость.

Для растений, чувствительных к хлору, и в первую очередь для наиболее ценных сельскохозяйственных культур, как табак, эфиромасличные, цитрусовые, виноград и некоторые другие, должно быть организовано производство сульфата калия. Для картофеля, льна, конопли, овощных и плодово-ягодных культур в районах нечерноземной полосы и северной части лесостепной зоны в качестве бесхлорного удобрения может быть использован сульфат калия-магния, который в ряде случаев (при отзывчивости этих растений на магний) будет иметь преимущество перед сульфатом калия.

В связи с отзывчивостью сахарной и кормовой свеклы на внесение натрия в ассортименте калийных удобрений должны быть представлены 30—40%-ные смешанные калийные соли и некоторое количество каинита для обеспечения этих культур натрийсодержащими удобрениями.

В основных районах СССР, как правило, получение наиболее высокого эффекта от использования минеральных удобрений достигается при снабжении сельскохозяйственных растений всеми тремя основными питательными элементами — азотом, фосфором и калием, а в ряде случаев при снабжении двумя элементами — азотом и фосфором или фосфором и калием.

Но в настоящее время в нашей стране комбинированные сложные или смешанные удобрения не производятся, и это вызывает необходимость изготовления на местах соответствующих смесей удобрений. Последнее осуществляется кустарным способом с весьма большими затратами, составляющими, как показали специальные обследования НИУИФ в 1956—1957 гг., от 30 до 50% всех внутрихозяйственных расходов на применение удобрений в хлопковых районах Средней Азии и в основных свекловичных районах. Изготовление смесей удобрений требует больших затрат, и, кроме того, эти смеси обладают крайне неудовлетворительными качествами как в отношении физических свойств, так и в отношении однородности состава. Естественно, что при таких условиях общий эффект от использования удобрений значительно уменьшается. Поэтому необходимо приступить к организации широкого производства высококачественных сложных удобрений и заводских гранулированных тукосмесей. Производство сложных удобрений может быть осуществлено различными путями. В настоящее время наиболее реален и перспективен способ азотнокислотной переработки фосфатов. Состав сложных удобрений, получаемых на основе азотнокислотной переработки фосфатов, может измениться в зависимости от принятого метода.

В таблице 4 приведен химический состав сложных удобрений — нитрофосок, полученных по различным методам азотнокислотной переработки фосфатов.

В нитрофоске, получаемой по карбонатному методу, вся P_2O_5 находится в цитратнорастворимой форме. Доступность растениям нерастворимых в воде фосфатов в значительной мере является функцией их поверхности. При гранулировании удобрений удельная поверхность их резко сокращается и степень доступности P_2O_5 значительно падает. Поэтому нитрофоска, получаемая по карбонатному методу, может служить хорошим источником P_2O_5 только при использовании ее в виде порошка.

Однако физические свойства порошковидной нитрофоски будут значительно худшими, чем гранулированного продукта.

Таблица 4

Химический состав сложных удобрений — нитрофосок, полученных по различным методам азотнокислотной переработки фосфатов

Удобрения	Содержание питательных элементов, %					
	N	P_2O_5			K_2O	сумма питательных элементов N, P_2O_5, K_2O
		водорастворимая	цитратнорастворимая	сумма (водоцитратнорастворимая)		
Нитрофоска, полученная по карбонатному методу	14,8	0,07	7,95	8,02	11,3 *	34,12
Нитрофоска, полученная с применением вымораживания для выделения $Ca(NO_3)_2$	16,1	3,62	10,52	14,14	17,4 *	47,64
Нитрофоска, полученная с применением более глубокого охлаждения	15,5	10,7	8,8	19,5	16,8 *	51,8
Нитрофоска импортная (из ФРГ)	13,6	4,37	9,15	13,52	12,0 **	39,12
Нитрофоска импортная (из Франции), полученная с применением азотной и серной кислот для разложения фосфатов	13,0	1,23	11,8	13,03	16,8 *	42,83

* Калий в форме хлорида.
** Калий в форме сульфата.

В составе нитрофоски, получаемой с применением вымораживания для удаления избытка кальция в виде нитрата, значительная часть P_2O_5 (от 30 до 60%) содержится в водорастворимой форме.

Гранулированная нитрофоска, содержащая значительную часть P_2O_5 в водорастворимой форме, может быть эффективно использована как для основного, так и для местного внесения (в рядки, лунки, гнезда).

В полевых опытах, проведенных на Долгопрудной агрохимической опытной станции, внесение в рядки под картофель небольшой дозы нитрофоски с Днепродзержинского азотнотукового завода состава 16 : 14 : 20 ($N : P_2O_5 : K_2O$) и содержащей 50% от общей P_2O_5 в водорастворимой форме давало эффект, приближающийся к эффекту, полученному от внесения почти в 3 раза больше дозы простых удобрений, но при внесении их вразброс (табл. 5).

Высокая удобрительная ценность и универсальность применения гранулированной нитрофоски, содержащей значительную часть P_2O_5 в водорастворимой форме, обусловливают целесообразность ее первоочередного производства. Получаемая при этом производстве кальциевая селитра является одной из наиболее эффективных форм азота для районов нечерноземной

Таблица 5

Эффективность нитрофоски при рядковом внесении ее под картофель

Удобрения	Урожай картофеля, ц/га
Без удобрений	229
15 кг P_2O_5 гранулированного суперфосфата в рядки	237
Нитрофоска 15 кг P_2O_5, 18 кг N, 21 кг K_2O в рядки	273
Гранулированный суперфосфат 15 кг P_2O_5 в рядки + + 18 кг N в NH_4NO_3 и 21 кг K_2O в KCl вразброс	242
45 кг N, P_2O_5 и K_2O в смеси NH_4NO_3, гранулированный суперфосфат и KCl вразброс	289

зоны и отчасти для свекловичных районов. Эти же районы должны являться и основными потребителями нитрофоски.

На почвах, богатых усвояемым калием (хлопковые районы Средней Азии), наиболее целесообразным является применение двойных азотно-фосфорных сложных удобрений. Производство последних может быть организовано как на основе азотнокислотной переработки фосфатов с выделением избытка кальция для получения удобрений, содержащих большую часть P_2O_5 в водорастворимой форме, так и путем аммонизации суперфосфата аммиакатами. В последнем случае может быть получено удобрение с содержанием 6—7% N и 12—15% P_2O_5. Аммонизированный аммиакатами суперфосфат, отношение $N : P_2O_5$, в котором близко к 1 : 2, может использоваться под хлопчатник в Средней Азии, под сахарную свеклу на Украине и в центральной черноземной зоне.

Обеспечение потребности сельского хозяйства в комбинированных удобрениях, содержащих в своем составе необходимые для тех или иных культур сочетания основных питательных для растений элементов, может быть осуществлено также при организации широкого производства заводских гранулированных тукосмесей. При этом могут быть получены удобрения с любым сочетанием питательных элементов и с хорошими физическими свойствами, допускающими беспрепятственное механизированное внесение.

Таким образом, учитывая особенности действия отдельных форм удобрений и условия их использования в основных районах СССР (почвенно-климатические факторы, реакция отдельных культур на формы удобрений, приемы использования удобрений и т. п.), можно определить примерно такой ассортимент удобрений для сельского хозяйства СССР (табл. 6).

Приведенные соотношения между отдельными формами азотных, фосфорных и калийных удобрений нужно рассматривать лишь как известную схему, вытекающую из развитых выше положений о целесообразности использования соответст-

Таблица 6

Целесообразный ассортимент минеральных удобрений для отдельных районов СССР

Районы	Азотные удобрения	Фосфорные удобрения	Калийные удобрения
Нечерноземная зона	Нейтральные и щелочные формы — 25% Аммиачная селитра — 20% Нитрофоска — 25% Жидкие азотные удобрения — 15% Мочевина — 15%	Суперфосфат — 45% Термические фосфаты — 13% Нитрофоска — 13% Фосфоритная мука — 29%	Хлористый калий — 80% Сульфат калия — магния — 15% 30—40%-ные калийные соли* — 5%
УССР, центральная черноземная, зона, Молдавская ССР	Аммиачная селитра — 35% Жидкие азотные удобрения — 15% Сульфат аммония — 15% Нитрофоска — 15% Нейтральные и щелочные формы — 5% Мочевина — 15%	Суперфосфат — 50% Аммонизированный суперфосфат — 12% Аммофос — 7% Нитрофоска — 13% Фосфоритная мука — 18%	Хлористый калий — 35% Сульфат калия — 18% Сульфат калия — магния — 12% 30—40%-ные калийные соли* — 35%
Поволжье и Северный Кавказ	Аммиачная селитра — 70% Мочевина — 30%	Суперфосфат — 50% Двойной суперфосфат — 50%	Хлористый калий — 60% Сульфат калия — 40%
Южный Урал и Казахстан (зерновые районы)	Аммиачная селитра — 100%	Суперфосфат — 40% Двойной суперфосфат — 60%	Хлористый калий — 100%
Западная Сибирь	Аммиачная селитра — 80% Мочевина — 20%	Двойной суперфосфат — 100%	Хлористый калий — 100%
Восточная Сибирь и дальневосточные районы	Аммиачная селитра — 60% Жидкие азотные удобрения — 15% Мочевина — 25%	Двойной суперфосфат — 100%	Хлористый калий — 100%
Средняя Азия и хлопковые районы Казахстана	Аммиачная селитра — 60% Жидкие азотные удобрения — 30% Сульфат аммония и мочевина — 10%	Суперфосфат — 30% Аммонизированный суперфосфат — 35% Аммофос — 35%	Хлористый калий — 70% Сульфат калия — 30%

Продолжение

Районы	Азотные удобрения	Фосфорные удобрения	Калийные удобрения
Закавказье	Аммиачная селитра — 50% Сульфат аммония — 25% Мочевина — 25%	Суперфосфат — 80% Термические фосфаты — 25% Фосфоритная мука — 15%	Хлористый калий 50% Сульфат калия — 50%
Весь СССР	Аммиачная селитра — 37% Жидкие азотные удобрения — 15% Нейтральные и щелочные формы — 10% Нитрофоска — 13% Сульфат аммония — 10% Мочевина — 15%	Суперфосфат — 39% Аммонизированный суперфосфат — 6% Двойной суперфосфат — 20% Аммофос — 4% Нитрофоска — 8% Термические фосфаты — 6% Фосфоритная мука — 17%	Хлористый калий — 70% Сульфат калия-магния — 13% Сульфат калия — 7% 30—40%-ные калийные соли* — 10%
	100%	100%	100%

* В том числе каинит в небольшом количестве.

вующих форм удобрений в отдельных районах СССР и из современного состояния технологии производства минеральных удобрений. Отдельные формы удобрений могут быть взаимозаменяемыми, если это окажется целесообразным по соображениям экономического или технического порядка. Так, например, с агрохимической точки зрения в большинстве случаев гранулированный, двойной и гранулированный простой суперфосфат могут рассматриваться как равноценные источники P_2O_5. И если в районах Сибири, Казахстана и других районах, приведенных в таблице ассортимента, в качестве фосфорного удобрения представлен двойной суперфосфат, то при этом учитывались только экономические преимущества последнего, обусловленные высокой концентрацией действующего элемента в этом удобрении. С точки зрения агрохимика также не имеет существенного значения, будет ли дано комбинированное тройное азотно-фосфорно-калийное удобрение в виде сложного удобрения (нитрофоски) или в виде гранулированной тукосмеси, содержащей эквивалентный набор тех же питательных элементов и в соответствующих формах. И если все же мы останавливаемся на нитрофоске, то только потому, что производство ее на основе азотнокислотной переработки фосфатов или другими

методами получения сложных удобрений имеет известные технико-экономические преимущества. Следует также сказать, что с дальнейшим развитием производства и применения минеральных удобрений в нашей стране масштабы потребления комбинированных сложных и гранулированных смешанных удобрений должны значительно увеличиваться.

Уровень потребления сульфата аммония будет определяться размерами производства этого удобрения в коксохимии.

Хлористый аммоний, если окажется особая целесообразность его получения в содовом производстве, также может быть использован в известных границах вместо сульфата аммония.

Наконец, весьма возможно, что в дальнейшем будут разработаны новые методы, открывающие дорогу для более широкого применения в сельском хозяйстве таких удобрений, как мочевина и ее труднорастворимые, но хорошо усваиваемые растениями производные, диаммофос и другие новые, более совершенные формы удобрений.

Д. Н. ПРЯНИШНИКОВ И ПРОБЛЕМА АЗОТА В ЗЕМЛЕДЕЛИИ *

При всей многогранности и широте научных интересов Д. Н. Прянишникова центральное место в его научной деятельности занимала проблема азота в земледелии в самом широком ее понимании. В разработке этой проблемы его исследованиям принадлежит исключительно выдающаяся роль, и его работы определили новую эру в этой области. Если теперь наши познания в этом актуальном разделе агрохимии достигли высокого уровня, то этим мы во многом обязаны трудам Д. Н. Прянишникова. Еще на заре своей научной деятельности, в начале 90-х годов прошлого столетия, в результате своих исследований он выдвинул новые положения об образовании и роли аспарагина в растении.

Д. Н. Прянишников установил, что аспарагин, вопреки господствовавшим тогда представлениям, не является первичным продуктом распада белков при прорастании семян, а вновь синтезируется в результате присоединения аммиака, образующегося при распаде белка, к аспарагиновой кислоте и последующей дегидратации образовавшегося при этом аспарагиновокислого аммония.

Логическим следствием из этой теории образования аспарагина в растениях явилось предположение о возможности усвоения растениями аммиака. Это была смелая мысль, так как в то время считалось, что аммиачный азот не может непосредственно усваиваться растениями и что если аммонийные соли и

* Статья опубликована в журнале «Агрохимия» № 11, 1965.

могут использоваться на удобрение, то только лишь потому, что в почве аммиак окисляется в нитраты и только эти последние являются единственным источником доступного для растений азота.

В ряде своих работ, которые могут служить классическим образцом научного исследования как по их целеустремленности, ясности замысла, так и по искусству выполнения, Д. Н. Прянишников опроверг эти неправильные представления и показал, что аммиачный азот может непосредственно использоваться растениями. Более того, он показал, что и окисленные соединения азота в растительной клетке неизбежно восстанавливаются до аммиака и что именно аммиак является исходным и конечным звеном во всей цепи превращений азотистых веществ в растении. «Аммиак есть альфа и омега в обмене азотистых веществ у растений, т. е. с него начинается синтез, им кончается распад и снова он вовлекается в круговорот, если есть налицо безазотистый материал *, — так сформулировал Д. Н. Прянишников итоги своих исследований в этом направлении. Установив принципиальную возможность усвоения аммиака растениями, он с исчерпывающей полнотой выясняет условия наиболее эффективного использования аммиачного азота.

История агрохимии не знает ни одной крупной проблемы, которая бы так полно и так всесторонне разрабатывалась, как вопрос усвоения растениями аммиачного азота, изученный в лаборатории Д. Н. Прянишникова. В ходе этих исследований для безупречного экспериментального доказательства ряда принципиальных положений были созданы новые методы вегетационного опыта: метод текучих культур, метод стерильных культур, метод изолированного питания растений. Характерной чертой этих исследований является стремление к установлению соответствий между биологическими особенностями растений, биохимическими их особенностями и условиями их азотного питания. Организм растений и среда в этих исследованиях изучались в их неразрывной связи. Сопоставляя результаты своих исследований азотного обмена у растений с данными сравнительной физиологии животных, Д. Н. Прянишников делает широкие обобщения о единстве строения и основных законов превращения белковых веществ в животном и растительном организме. Таким образом, тот, казалось бы с первого взгляда, специальный вопрос, с разработки которого начал свою научную деятельность Д. Н. Прянишников, в конечном итоге завершился постановкой важнейшей общебиологической проблемы, и то, что это сумел сделать Д. Н. Прянишников, характеризует его и как исследователя-экспериментатора и как мыслителя. Если в дореволюционный период, когда в нашей стране не было

* Д. Н. Прянишников. Избр. соч. в трех томах т. II. М., Сельхозгиз, 1953, стр. 39.

азотной промышленности и не было речи о ее создании, Д. Н. Прянишников решал проблему азота в питании растений как проблему физиологическую и как проблему биохимическую, то после Великой Октябрьской социалистической революции, когда наша страна стала на путь социалистического переустройства, Д. Н. Прянишников исследует проблему азота не только как физиологическую, но и как проблему агрономическую, и как проблему народнохозяйственную. Еще в 20-х годах среди широких агрономических кругов в нашей стране было распространено неправильное представление, что будто бы наши почвы в подавляющей своей части неотзывчивы на минеральные удобрения, в частности на азотные, и что применение их у нас является преждевременным, а проблема повышения урожайности должна решаться другими путями. Это ошибочное представление могло тормозить развитие промышленности минеральных удобрений, и Д. Н. Прянишников положил немало усилий для разоблачения этих ошибочных, предвзятых мнений.

По инициативе Д. Н. Прянишникова в 1927—1929 гг. Научным институтом по удобрениям, руководителем агрохимического отдела которого был тогда Д. Н. Прянишников, были проведены по единому плану широкие географические опыты с удобрениями, охватившие все разнообразие почвы и культур нашей страны. Это была беспрецедентная по своим масштабам работа. Достаточно сказать, что в проведении этих опытов участвовало более 300 научно-исследовательских учреждений — институтов, опытных станций и опытных полей, расположенных по всей территории нашей страны — от Заполярья до субтропиков. В результате проведения этих опытов было установлено, что азотные, как и другие удобрения, на наших почвах не менее эффективны, чем в западных странах. Особенно большое значение азота для повышения урожайности сельскохозяйственных культур было установлено для районов подзолистых и переходных почв и для орошаемых земель хлопковых районов Средней Азии и Закавказья. Более того, оказалось, что и на черноземах, обладающих сравнительно высоким естественным плодородием, применение азотных удобрений дает высокий эффект. И только в районах сухих степей, где недостаток влаги является лимитирующим фактором, потребность в азоте выражена недостаточно четко. Полученные в этой работе данные послужили отправным пунктом для построения планов развития химической промышленности в самых широких масштабах. И когда у нас была создана мощная азотная промышленность и азотные удобрения вошли в широкую практику социалистического земледелия, данные о высокой эффективности азота получили новое подтверждение на миллионах гектаров колхозных и совхозных полей.

Достаточно сказать, что урожайность важнейшей технической культуры — хлопчатника уже в первые годы снабжения

районов возделывания этой культуры азотными удобрениями поднялась в среднем более чем в два раза. Можно с уверенностью сказать, что теперь каждый практический работник сельского хозяйства, агроном, колхозник по достоинству может оценить значение аммиачной селитры, этого основного вида азотного удобрения в нашей стране, «путевка в жизнь» которому была дана именно работами Д. Н. Прянишникова.

Неустанно борясь за развитие производства азотных удобрений в нашей стране, Д. Н. Прянишников в то же время постоянно указывал на необходимость улучшения азотного баланса в земледелии за счет привлечения дарового источника связанного азота, синтезируемого биологическим путем в посевах клевера, люцерны, люпина и других бобовых культур. Расширению посевов этих культур, и прежде всего клевера и люцерны, Д. Н. Прянишников придавал исключительно большое значение в деле повышения продуктивности сельского хозяйства. В первые же дни после окончания второй мировой войны, когда в нашей стране началось восстановление промышленности азотных удобрений и уже разрабатывались планы ее развития на первое послевоенное пятилетие, Д. Н. Прянишников, понимая, что химическая промышленность в те годы не могла обеспечить полностью потребность сельского хозяйства в азоте, считал, что производство азотных удобрений в ближайшие годы должно все же достичь такого размера, который был бы достаточен по крайней мере для удобрения по средним нормам 24 млн. га технических и других интенсивных культур. Он считал, что для этих целей потребуется не менее 1—2 млн. т азота. Основное же направление в улучшении азотного баланса зерновых культур для того времени должно заключаться главным образом в ставке на азот биологический.

Обеспечение всех интенсивных культур техническим азотом и расширение посевов бобовых трав для улучшения азотного баланса в земледелии и как дополнительной кормовой базы для развития животноводства, разумеется, ни в коей мере не ставит каких-либо ограничений для дальнейшего развития промышленности минеральных азотных удобрений. Д. Н. Прянишников считал, что такое решение вопроса нужно рассматривать лишь «как один из этапов на пути к дальнейшему росту, в процессе которого мы сможем и должны будем далеко опередить считавшиеся раньше передовыми в техническом и экономическом отношениях страны» *.

Именно потребность в удобрениях зерновых культур, возделываемых на огромных площадях в нашей стране, и становится основным фактором, определяющим дальнейшее развитие промышленности минеральных удобрений. «Когда азотная продук-

* Д. Н. Прянишников. Избр. соч. в трех томах т. II. М., Сельхозгиз, 1953, стр. 168.

ция будет обслуживать и хлеба, размеры нашей азотной промышленности превзойдут по мощности не только суммарную мощность заводов европейских стран, но они смогут конкурировать и с мировой промышленностью, если бы это оказалось нужным *. Такими словами заканчивает Д. Н. Прянишников вторую часть монографии «Азот в жизни и в земледелии СССР».

Стремительное развитие отечественной азотной промышленности, происходящее в последние годы, дает основание считать, что не так далеко то время, когда потребление азотных удобрений в сельском хозяйстве нашей страны будет приближаться по своим размерам к современному потреблению их во всех зарубежных странах, вместе взятых.

В решении зерновой проблемы Д. Н. Прянишников придавал исключительное значение использованию тех возможностей, которые предоставляет огромная территория нечерноземной зоны. Он считал, что именно в этой зоне, не знающей засухи, при рациональном использовании таких средств повышения урожайности, как известкование, клеверосеяние, применение удобрений, в любой год можно получать гарантированные урожаи зерна и таким образом застраховать себя от тяжких последствий засухи, время от времени посещающей традиционные зерновые районы юга и юго-востока. Задача превращения нечерноземной зоны в зону высокого плодородия в настоящее время является особенно актуальной в связи с резко возросшей потребностью страны в сельскохозяйственной продукции. В нечерноземной зоне и во влажной части черноземной зоны размещено почти 110 млн. га посевных площадей с.-х. культур, в том числе около 60 млн. га зерновых культур.

В настоящее время развитие нашей химической промышленности уже позволяет выделить значительные количества минеральных удобрений не только под технические, как это было во времена Д. Н. Прянишникова, но и под зерновые культуры. С каждым годом вводятся в эксплуатацию новые заводы минеральных удобрений, и к 1970 г. ожидается выпуск удвоенного количества удобрений по сравнению с 1965 г.

Было бы целесообразно весь новый прирост минеральных удобрений направить именно в районы нечерноземной зоны и другие влажные районы, где мы можем получать при сравнительно умеренных дозах и при соблюдении элементарных требований агротехники в среднем около 25 ц зерна с гектара, а при некотором повышении доз удобрений и до 30 ц зерна.

Таким образом, только в этих обеспеченных влагой районах можно довести валовой сбор зерна до 150 млн. т и тем самым обеспечить полную независимость зернового баланса от капри-

* Д. Н. Прянишников. Там же, стр. 168.

зов погоды в южных и восточных районах страны, являющихся в настоящее время основными производителями зерна.

Огромные площади в нечерноземной зоне заняты естественными лугами и пастбищами, производительность которых может быть резко увеличена при достаточном снабжении удобрениями, и прежде всего азотом. Результаты опытов и практика применения удобрений на лугах показывают, что каждый килограмм азота, использованного на лугах и пастбищах, оплачивается 20—25 л молока или 2 кг мяса. Превращение нечерноземной зоны и других влажных районов в главную зерновую базу с одновременным резким увеличением производства в этой же зоне картофеля, овощей и продуктов животноводства потребует, в согласии с произведенными расчетами, около 7 млн. т азота и соответствующего количества фосфора и калия. Снабжение влажных районов таким количеством удобрений должно явиться ближайшей целью химической промышленности. Достижение этой цели потребует значительных усилий. Но это является необходимым условием для создания высокопродуктивного сельского хозяйства в этих районах.

Азотная промышленность, по образному выражению Д. Н. Прянишникова, «является как бы новой страной, поставляющей на мировой рынок громадное количество хлеба и конкурирующей с прежними экспортерами» *. Потенциальные возможности этой «новой страны» огромны. Уже теперь мировое потребление азотных удобрений превышает 12 млн. т в пересчете на азот. Так как каждая тонна азота в среднем дает прирост зерна 16 т, то все мировое производство азотных удобрений, если бы его использовать только под зерновые культуры, привело бы к увеличению продукции зерна более чем на 150 млн. т. Чтобы получить такой сбор зерна без применения азотных удобрений, потребовалась бы новая территория с посевной площадью не менее 150 млн. га, что примерно равно современной посевной площади такой страны, как США. В последние годы в широкую практику сельского хозяйства ряда стран успешно внедряются новые неполегающие сорта зерновых, и прежде всего пшеницы. Все эти неполегающие сорта характеризуются весьма высокой требовательностью к азотному питанию и при внесении высоких доз азота дают урожаи, намного превосходящие даже лучшие старые сорта пшеницы. В ряде западных стран уже теперь значительная часть общей посевной площади пшеницы занята под посевами новых неполегающих сортов, где вносится на гектар от 120 до 180 кг азота и достигается урожайность в 50—70 ц/га. В СССР есть также такой сорт неполегающей пшеницы — Безостая 1, который даже на богатых кубанских черноземах требует хорошего азотного

* Д. Н. Прянишников. Избр. соч. в трех томах, т. III. М., Сельхозгиз, 1953, стр. 413.

удобрения, давая при этом урожай 50—60 ц и больше. Можно ожидать, что и для нашей нечерноземной зоны будут выведены неполегающие сорта пшеницы, способные при соответствующем увеличении доз азотных удобрений давать столь же высокие урожаи. При таких условиях окажется возможным полностью обеспечить внутреннюю потребность нашей страны в зерне за счет резкого увеличения его сбора в нечерноземной и влажной части черноземной зоны, а избыток зерна, производимого в других районах, пойдет на создание мощного экспортного фонда.

Стремясь найти правильное решение азотной проблемы, Д. Н. Прянишников рассматривал и исследовал ее в тесной связи как с общими проблемами науки, так и с жизненно важными практическими задачами. Он чутко прислушивался к запросам практики, откликался на эти запросы и внимательно следил за всем новым, что возникало в науке, сельском хозяйстве, промышленности. Он был представителем той науки, которая все свои силы отдает служению народу, Родине. Его идеи, его мысли легли в основу построения азотной промышленности в нашей стране, и вся его деятельность постоянно вдохновляла на дальнейшее ее развитие. И теперь, когда советская азотная промышленность с каждым годом становится все более мощной, той «новой страной», способной поставлять на рынок миллиарды пудов хлеба, мы с благодарностью вспоминаем имя Д. Н. Прянишникова, труд которого сыграл столь огромную роль в нашем продвижении в эту «новую страну».

То научное направление в агрономической химии, основы которого были созданы Д. Н. Прянишниковым, продолжает успешно развиваться и углубляться в работах советской, прянишниковской школы агрохимиков. За последние годы наша наука в разработке азотной проблемы обогатилась рядом новых достижений. Этому в значительной мере способствовало использование новых физико-химических и физических методов исследования. Особенно большое значение имело применение меченых атомов, позволившее проследить основные пути превращения азотистых соединений в почве и в растениях.

Аммонийный азот, огромная роль которого в жизни растений была впервые установлена работами Д. Н. Прянишникова, как оказалось в результате исследований, проведенных в последние годы, во многих случаях может быть более эффективно использован, чем нитратный, если только устранено побочное влияние физиологической или биологической кислотности аммонийных солей. Последнее, как известно, при необходимости (на кислых почвах) может быть достигнуто применением извести или других нейтрализующих материалов.

Аммонийный азот быстрее используется в тканях растений на синтез аминокислот и белка, чем нитратный азот. Применение меченых источников азота с привлечением методов хроматографии показало, что при внесении обычно применяемых в

практике доз азотных удобрений аммонийный азот, поступая в корни растений в течение очень коротких промежутков времени, не превышающих 5—10 минут, почти полностью используется в корнях на синтез аминокислот и уже в таком переработанном виде поступает в листья, где и идет на синтез белка. Нитратный азот значительно медленнее используется на синтез аминокислот и белка, так как этому процессу должно предшествовать восстановление нитратов до аммиака. Это можно видеть из данных таблицы 1.

Таблица 1

Скорость поступления и последующего использования в растениях (овес) аммонийного и нитратного азота на синтез аминокислот и белка

Варианты опыта	Через 24 часа после внесения меченого азота в форме		Через 72 часа после внесения меченого азота в форме	
	$(N^{15}H_4)_2SO_4$	$Ca(N^{15}O_3)_2$	$(N^{15}H_4)_2SO_4$	$Ca(N^{15}O_3)_2$
Весь поступивший в растения меченый азот, мг на 100 г сырого веса растений	28,14	29,15	104,1	108,53
Меченый азот, найденный в составе:				
аминокислот	10,12	5,19	26,32	17,80
белка	12,38	7,0	61,8	55,05
амидов	2,32	0,32	13,36	2,03
неорганических соединений (NH_3 или NO_3)	3,32	16,64	5,57	32,61

Оказалось также, что при внесении в почву аммонийных удобрений потери их азота, вызываемые деятельностью денитрификаторов, происходят в значительно меньших размерах, чем при внесении нитратных удобрений. Изучение взаимного влияния отдельных катионов и анионов, встречающихся в составе удобрений, на их поступление в растения показало, что ионы аммония при своем вхождении в растения в известной мере избирательно увлекают за собой фосфатные ионы, и это приводит к более высокому использованию фосфатов, чем при внесении нитратного азота. Поэтому фосфаты аммония являются более эффективными источниками P_2O_5, чем простой или двойной суперфосфат, и это необходимо учитывать в дальнейших планах развития промышленности удобрений. С точки зрения экономической аммонийный азот имеет также большое преимущество перед нитратным вследствие того, что концентрация азота в группе NH_4 почти в 3,5 раза выше, чем в группе NO_3, и, кроме того, аммонийный азот всегда будет дешевле, чем азот нитратный, получаемый путем последующей переработки

аммиака. Поэтому все современное развитие азотной промышленности идет под знаком наиболее интенсивного развития производства таких форм удобрений, в составе которых аммонийный азот занимал бы возможно более высокий удельный вес, или таких производных аммиака, как мочевина, которую вследствие быстрого ее превращения в почве в карбонат аммония следует рассматривать как аммонийное удобрение.

Одним из основных результатов работ Д. Н. Прянишникова по усвоению азота растениями является установление зависимости между переработкой аммиака растениями и степенью обеспеченности их углеводами, являющимися тем исходным пластическим материалом, за счет которого строится углеродистый скелет аминокислот. Проведенными исследованиями установлено, что степень обеспеченности растений углеводами наибольшее значение имеет не столько для начальных этапов усвоения аммиака растениями, сколько для конечного этапа переработки азотистых соединений, для синтеза белка.

При даче в подкормку растениям, меченных изотопом N^{15}, источников азота было показано, что в темноте, когда в отсутствие фотосинтеза не происходит нового образования дисахаридов в растениях, внесенный меченый азот использовался на синтез аминокислот, но практически не включался в состав белка из-за полного прекращения его синтеза (табл. 2).

Таблица 2

Меченый азот, использованный растениями на синтез аминокислот и белка на свету и в темноте, мг

Продолжительность экспозиции растений на питательных растворах в N^{15}, час.	Свет		Темнота	
	синтез аминокислот	синтез белка	синтез аминокислот	синтез белка
24	17,9	9,7	10,4	0,0
72	38,2	53,4	18,7	0,0

Однако наличие света в принципе не является необходимым для синтеза белка в растениях. Если растения, ранее испытывавшие некоторый недостаток азота и поэтому содержащие в своих тканях повышенные количества дисахаридов, поместить в темноту, то новый синтез белка будет происходить до тех пор, пока не будут исчерпаны запасы в растениях дисахаридов.

Применение изотопной техники и хроматографии позволило установить последовательность в образовании растениями отдельных аминокислот за счет использования неорганических источников азота — аммонийных солей или нитратов. В первую очередь синтезируются аланин и дикарбоновые аминокислоты — глутаминовая и аспарагиновая кислоты — путем непосредственного аминирования соответствующих α-кетокислот. Образование

основных и ароматических аминокислот происходит позже в результате реакций переаминирования. Далее было показано, что белок в растениях постоянно обновляется — индивидуальные молекулы белка не являются сколько-нибудь долговечными. Продолжительность их жизни обычно измеряется несколькими десятками часов и не превышает 100—120. Таким образом, в растениях постоянно происходит разрушение и одновременно воссоздание новых молекул белка из аминокислотного фонда.

Путем подбора соответствующих экспериментальных условий удалось доказать, что распад белковых молекул до аминокислот происходит в прямой зависимости от их возраста: избирательно распадаются более старые белковые молекулы. Скорость синтеза и обновления белка изменяется от возраста, состояния питания и общих условий местообитания растений. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в молодых быстрорастущих органах и тканях растений. Интенсивность обновления белка падает при недостатке калия, вследствие чего резко снижается и использование азота на синтез белка и замедляется переработка аммиака на синтез аминокислот. Поэтому при питании растений аммонийным азотом обеспеченность почвы калием имеет гораздо большее значение, чем при нитратном питании.

Д. Н. Прянишников устно и в выступлениях в печати уделял много внимания правильному рациональному использованию азотных удобрений. Он не уставал напоминать, что обеспеченность почвы фосфором, калием, ее реакция, агротехнический фонд, условия водного режима имеют важнейшее значение для получения высокого эффекта от применения азотных удобрений. И долгом всех агрохимиков, агрономов и практических работников сельского хозяйства является создание таких условий для роста растений, чтобы можно было вырастить три колоса там, где прежде рос один.

БИБЛИОГРАФИЯ ТРУДОВ Ф. В. ТУРЧИНА

1925 г.

Памяти Дарвина (псевдоним: Дарвініст). Порадник Радомиськоі досвідноі станіі, № 2, Київ.

Де-які висновки з работи «Лізиметричноі станціі» при відділі агрохеміі. Порадник Радомиськоі досвідоі станціі, № 2, Киев.

1926 г.

Некоторые черты в эволюции органического вещества песчаных почв Украинского Полесья. Научно-агрономический журнал № 12.

1928 г.

Элементы рельефа и растительные сообщества. Бюллетень Полесской областной сельскохозяйственной опытной станции им. А. Н. Засухина, № 3/34, Киев.

1929 г.

Влияние мергеля, соломы и глины на песчаных почвах. Труды Полесской областной сельскохозяйственной опытной станции им. А. Н. Засухина, т. III, вып. 43, Киев.

1931 г.

Поступление, транспорт и дефицит азота озимой ржи. Труды Полесской областной сельскохозяйственной опытной станции им. А. Н. Засухина, т. V, вып. 45, Киев.

Образование нитратов и нитритов в растениях. Труды Полесской сельскохозяйственной опытной станции им. А. Н. Засухина, т. V, вып. 45, Киев.

Азот в сельском хозяйстве и в военном деле. Л., Сельхозгиз.

Превращение мочевины в почве. — «Удобрение и урожай» № 6.

1933 г.

Аммонизированные суперфосфаты. — В кн.: Новое в удобрении почв. М., Сельхозгиз.

Роль отдельных катионов и анионов в усвоении растениями аммонийного азота. Z. Pflanzenernähr., Dung., Bodenkunde, Bd. 43.

Необходимые для растений элементы. Справочник по удобрениям. НИУ. Л., Госхимтехиздат.

Факторы действия азотных удобрений (в соавторстве с Е. И. Ратнером). Справочник по удобрениям. НИУ. Л., Госхимтехиздат.

Химический состав растений и вынос питательных веществ урожаями. Справочник по удобрениям. НИУ. Л., Госхимтехиздат.

Углекислота и растение. Справочник по удобрениям. НИУ. Л., Госхимтехиздат.

Поступление питательных веществ в растение. Справочник по удобрениям. НИУ. Л., Госхимтехиздат.

Хранение и смешивание удобрений в хозяйстве. Выбор форм удобрений. Справочник по удобрениям. НИУ. Л., Госхимтехиздат.

Сроки внесения удобрений. Справочник по удобрениям. НИУ. Л., Госхимтехиздат.

1934 г.

Влияние калия на азотный углеводный обмен растений. Z. Pflanzenernähr., Dung., BodenKunde, Bd. 35, N 5/6.

Доступность растениям цитратнорастворимой фосфорной кислоты. Phosphorsäure, Bd. 4, N 8—9.

Азотные удобрения (в соавторстве с А. М. Дубовицким и А. П. Белопольским). — В кн.: Химическая промышленность в борьбе за урожай. Работа НИУИФ 1919—1934. М.

1935 г.

Агрохимическое изучение мочевины. — «Минеральные удобрения и инсектофунгициды» № 2.

Агрохимическая оценка аммонитрофосов. — «Минеральные удобрения и инсектофунгициды» № 3.

Die Rolle des Kalium und des Phosphors bei der Ausnutzung des Nitral und Ammoniakstickstoffs durch Pflanzen. (Роль калия и фосфора при использовании нитратного и аммиачного азота растениями). — В кн.: Доклады НИУИФ к III Международному конгрессу почвоведов в Оксфорде. ОНТИ. Л., Химтеорет.

Агрохимическая характеристика калийно-аммиачной селитры. — «Минеральные удобрения и инсектофунгициды» № 4.

Аммонизация суперфосфатов и ее влияние на усвояемость фосфорной кислоты. — В кн.: Труды НИУИФ. Вып. 126, М., Химиздат.

Результаты агрохимических исследований по изучению аммонитрофосов. — В кн.: Труды НИУИФ. Вып. 126, М., Химиздат.

1936 г.

Роль калия и фосфора в использовании растениями нитратного и аммиачного азота. — В кн. Труды майской сессии АН СССР. 1935. Почвоведение и агрохимия. М. — Л., Изд-во АН СССР.

О природе действия удобрений (азот, фосфор, калий). М., Сельхозгиз.

Эффективность азотно-фосфатных удобрений, полученных при азотнокислой экстракции фосфатного сырья. — «Химическая промышленность», т. XIII, № 19.

Zersetzung der Nitrite in mit Basen ungesättigten Böden und das Problem der Nitrification (Разложение нитритов в почвах, не насыщенных основаниями, и проблема нитрификации) Zn. Pflanzenernähr., Dung., Bodenkunde, Bd. 43, N 3/4.

1937 г.

Влияние калия на азотный и углеводный обмен в растениях. — В кн.: Труды НИУИФ. Вып. 136. М., Химиздат.

Значение формы азотного удобрения для зольного питания растений. — В кн.: Новое в удобрении. Вып. 2, М., Сельхозгиз.

Азотные удобрения. — В кн.: Справочник агронома по удобрениям. М., Сельхозгиз.

1938 г.

Доступность растениям цитратнорастворимой фосфорной кислоты. — В кн.: Труды НИУИФ. Вып. 141.

Об известковании аммиачных удобрений. — «Химическая промышленность», т. XV, № 9.

1939 г.

Повышение коэффициента действия физиологически кислых азотных удобрений путем их известкования (в соавторстве с Ю. Ф. Чириковым). — «Химизация социалистического земледелия», № 8.

1940 г.

Влияние калийно-фосфатного фона на использование растениями аммиачных и нитратных форм азота. — «Химизация социалистического земледелия» № 9.

Сравнительная эффективность различных форм азотных удобрений. — «Химическая промышленность», т. XVII, № 1.

Сравнительная эффективность различных форм фосфорных удобрений. — «Химическая промышленность», т. XVII, № 9.

Эффективность калийных удобрений для основных сельскохозяйственных культур СССР. — «Химическая промышленность», т. XVII, № 12.

Химия растений. — В кн.: Спутник агрохимии. М., Сельхозгиз.

Калийные удобрения. Азотные удобрения. — В кн.: Спутник агрохимика. М., Сельхозгиз.

1943 г.

Минеральные удобрения и их применение. М. — Л., Изд-во АН СССР.

Способ получения концентрата витамина С из хвои. Авторское свидетельство № 62398 (3631 от 29 июня 1942 г.). — В кн.: «Бюллетень изобретений», № 2—3.

1944 г.

Методы определения степени обеспеченности почв азотом. — В кн.: Руководство для полевых и лабораторных исследований почв. Современные агрохимические методы исследований почв. Лабораторные методы. Т. 5, вып. 1, М. — Л., Изд-во АН СССР.

Методы определения степени обеспеченности почв усвояемым калием. — В кн.: Руководство для полевых и лабораторных исследований. Вып. 1. Лабораторные методы. М. — Л., Изд-во АН СССР.

Об удобрительной ценности препаратов азотобактера. — «Почвоведение» № 6.

1946 г.

Агрохимические исследования в области удобрений (в соавторстве с Л. И. Королевым, А. В. Соколовым, С. В. Щербой). — В кн.: XXV лет работы НИУИФ. Итоги работ 1919—1944 гг. М. — Л., Госхимиздат.

1947 г.

Влияние калия на использование аммиачного азота и синтез белка в растениях в связи с особенностями их углеводного состава. — В кн.: Доклады АН СССР, т. 57, № 1.

1950 г.

Роль калия в усвоении аммиака и в образовании активных форм углеводов в растении. — В кн.: Памяти акад. Д. Н. Прянишникова. М. — Л., Изд-во АН СССР.

Об активном марганце в почве и его токсичности в связи с применением физиологически кислых форм азотных удобрений (в соавторстве с В. И. Соколовой). — «Почвоведение» № 9.

О нейтрализации потенциальной кислотности аммиачной селитры. —«Химическая промышленность», № 12.

1953 г.

О скорости обновления белка и хлорофилла в высших растениях (в соавторстве с М. А. Гуминской и Е. Г. Плышевской). — В кн.: Известия АН СССР. Серия биологическая, № 6. М., Изд-во АН СССР.

Творчески осваивать научное наследие (К выходу избр. соч. акад. Д. Н. Прянишникова). — «Вестник АН СССР» № 10.

1954 г.

Методы определения соединений азота в почве. — В кн.: Агрохимические методы исследования почв. М., Изд-во АН СССР.

Методы определения подвижных соединений калия в почве. — В кн.: Агрохимические методы исследования почв. М., Изд-во АН СССР.

Питание растений и применение удобрений. — «Почвоведение» № 6.

1955 г.

Исследование азотного обмена растений с применением изотопа N^{15} (в соавторстве с М. А. Гуминской и Е. Г. Плышевской). — «Физиология растений», т. 2, № 1.

Исследование азотного обмена растений с применением изотопа азота N^{15} (в соавторстве с М. А. Гуминской и Е. Г. Плышевской). — В кн.: Меченые атомы в исследованиях питания растений и применения удобрений. Труды совещания. М., Изд-во АН СССР.

Исследование азотного питания и обмена у растений с применением изотопа N^{15} (в соавторстве с М. А. Гуминской, Е. Г. Плышевской, М. В. Тихомировым и В. В. Зерцаловым). — «Почвоведение» № 7.

Влияние кондиционирующих добавок на качество аммиачной селитры (в соавторстве с В. И. Соколовой). — «Химическая промышленность» № 2.

1956 г.

Новые виды минеральных удобрений. — «Вестник сельскохозяйственной науки» № 2.

Об использовании в сельском хозяйстве жидких азотных удобрений. — «Удобрение и урожай» № 2.

Роль минерального и биологического азота в земледелии СССР. — «Почвоведение» № 6.

О перспективах применения известково-аммиачной селитры в нечерноземной полосе СССР. — «Удобрение и урожай» № 11.

1957 г.

Современные вопросы применения азотных удобрений и азотного питания растений. — В кн.: Доклады на совещании МСХ СССР по вопросам наиболее эффективных способов использования минеральных, органических и бактериальных удобрений. М., Сельхозгиз.

Применение минеральных удобрений в зарубежных странах. —«Химическая промышленность» № 3.

Жидкие азотные удобрения. М., «Знание».

1958 г.

О перспективной потребности сельского хозяйства СССР в минеральных удобрениях и их целесообразном ассортименте. — «Удобрение и урожай», № 8.

Химия на службе сельского хозяйства. В кн.: В помощь лектору. М., «Знание» № 1.

Изучение биологической фиксации атмосферного азота в клубеньках бобовых растений с применением изотопа N^{15} (в соавторстве с З. Н. Берсеневой, Е. Г. Плышевской и В. В. Зерцаловым). — В кн.: Труды Всесоюзной научно-технической конференции по применению радиоактивных и стабильных изотопов и излучений в народном хозяйстве и науке (4—12 апреля 1957 г.). Физиология растений, агрохимия, почвоведение. М., Изд-во АН СССР.

1959 г.

Новый этап в развитии производства и применения минеральных удобрений в СССР. — «Удобрение и урожай» № 1.

Новые данные о механизме фиксации атмосферного азота в клубеньках бобовых растений. — «Почвоведение» № 10.

Эффективность сложных удобрений, получаемых на основе азотнокислотной переработки фосфатов (в соавторстве с В. И. Соколовой). — «Удобрение и урожай» № 10.

1960 г.

Химический состав растений. —В кн.: Справочник по минеральным удобрениям. М., Сельхозиздат.

Агрохимия элементов питания растений. Азот. Калий. Натрий. — В кн.: Справочник по минеральным удобрениям. М., Сельхозиздат.

Содержание воды и питательных веществ в растениях. — В кн.: Справочник по минеральным удобрениям. М., Сельхозиздат.

Механизм поступления питательных веществ в растение. — В кн.: Справочник по минеральным удобрениям. М., Сельхозиздат.

Анализ удобрений. Азот. Калий. Натрий. — В кн.: Справочник по минеральным удобрениям. М., Сельхозиздат.

Динамика поступления питательных веществ в растение. — В кн.: Справочник по минеральным удобрениям. М., Сельхозиздат.

Азотные удобрения. Калийные удобрения. Натриевые удобрения. —В кн.: Справочник по минеральным удобрениям. М., Сельхозиздат.

Потребность сельского хозяйства СССР в минеральных удобрениях. — В кн.: Справочник по минеральным удобрениям. М., Сельхозиздат.

Перспективы производства и применения минеральных удобрений в Восточной Сибири (в соавторстве с С. И. Вольфковичем, Я. А. Иоффе, А. М. Левиным). — В кн.: Химическая промышленность Восточной Сибири. М., Изд-во АН СССР.

Методы определения соединений азота в почве. — В кн.: Агрохимические методы исследования почв. Руководство для полевых и лабораторных исследований. М., Изд-во АН СССР.

Перспективы применения минеральных удобрений в СССР. — «Почвоведение» № 5.

Превращение азота в почве по данным исследований с применением изотопа N^{15} (в соавторстве с З. Н. Берсеневой, И. А. Корицкой, Г. Г. Жидких, Г. А. Лобовиковой). — В кн.: Доклады советских почвоведов к VII Международному конгрессу в США. М., Изд-во АН СССР.

1961 г.

О потребности Северо-Западной зоны СССР в азотных удобрениях и их целесообразном ассортименте. — В кн.: Труды Ленинградского инженерно-экономического ин-та. Вып. 37. Л.

О целесообразном ассортименте минеральных удобрений. — В кн.: Минеральные удобрения и гербициды. М., НИУИФ.

Об использовании бикарбоната аммония на удобрение (в соавторстве с В. И. Соколовой). — «Земледелие» № 12.

1962 г.

Применение изотопа P^{32} и N^{15} в агрономической химии (в соавторстве с А. В. Соколовым). — Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева, т. VII, № 5.

Мочевино-формальдегидные удобрения. — В кн.: Сборник материалов Технического семинара на ВДНХ СССР по производству мочевины и применению ее в народном хозяйстве, М.

О применении мочевины в сельском хозяйстве. — В кн.: Сборник материалов Технического семинара на ВДНХ СССР по производству мочевины и применению ее в народном хозяйстве. М.

Проблема азота в земледелии. М., «Знание».

Перспективы применения минеральных удобрений (в соавторстве с А. В. Петербургским). — «Вестник сельскохозяйственной науки», № 7.

1963 г.

Полностью использовать дары большой химии (в соавторстве с В. М. Борисовым, С. И. Вольфковичем, М. В. Каталымовым, Л. И. Королевым, А. С. Ленским, А. В. Соколовым). — «Правда», № 321, от 17 ноября.

Плодородие безгранично. — «Комсомольская правда», № 298, от 21 декабря.

Фиксация атмосферного азота in vitro ферментными препаратами, выделенными из клубеньков бобовых и из неинфицированных бактериями высших растений (в соавторстве с З. Н. Берсеневой, Г. Г. Жидких). — В кн.: Докл. АН СССР, т. 149, № 3.

1964 г.

Превращение азотных удобрений в почве и усвоение их растениями. — «Агрохимия», № 3.

Взаимодействие азота, фосфора и калия в питании растений при использовании ими нитратных и аммонийный форм азота. — «Агрохимия», № 5.

О применении мочевины в сельском хозяйстве (в соавторстве с Б. Г. Блюмом, И. Г. Кондратьевым, И. Л. Мокровой, Г. Г. Жидких). — «Агрохимия» № 8.

Мочевино-формальдегидные удобрения (в соавторстве с В. И. Соколовой, Б. Г. Блюмом). — «Химия в сельском хозяйстве» № 2.

Знание химии — оружие земледельца. — «Известия», № 7, от 8 января.

Сведения по общим вопросам агрохимии, азотным и комплексным удобрениям. — В кн.: Химизация сельского хозяйства. Научно-технический словарь-справочник. М.

Превращение азотных удобрений в почве и их использование растениями (в соавт. с И. А. Корицкой, Г. Г. Жидких). — В кн.: Плодородие и мелиорация почв СССР. Докл. к VIII Международному конгрессу почвоведов. Изд-во АН СССР. М.

1965 г.

Использование азотных удобрений урожаем и их превращение в почве. — Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева, т. X, № 4.

Д. Н. Прянишников и проблема азота в земледелии. — «Агрохимия» № 11.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5
Азотные и сложные удобрения 8
Превращение мочевины в почве 8
Агрохимическое изучение мочевины 17
Об использовании бикарбоната аммония на удобрение 28
О применении мочевины в сельском хозяйстве 37
Мочевино-формальдегидные удобрения 55
Повышение коэффициента действия физиологически кислых азотных удобрений путем их известкования 64
Влияние кондиционирующих добавок на качество аммиачной селитры 74
О перспективах применения известково-аммиачной селитры в нечерноземной полосе СССР 83
Агрохимическая характеристика калийно-аммиачной селитры 93
Эффективность сложных удобрений, получаемых на основе азотнокислотной переработки фосфатов 98
Об использовании в сельском хозяйстве жидких азотных удобрений 109
К вопросу о применении в сельском хозяйстве торфо-минеральных аммиачных удобрений 115
Превращение азотных соединений в растениях и почве 120
Влияние калийно-фосфатного фона на использование растениями аммиачных и нитратных форм азота 120
Роль калия в усвоении аммиака и в образовании активных форм углеводов в растении 135
Взаимодействие азота, фосфора и калия в питании растений при использовании ими нитратных и аммонийных форм азота 147
О скорости обновления белка и хлорофилла в высших растениях . . 156
Исследование азотного обмена растений с применением изотопа азота N^{15} 173
Исследования азотного питания и обмена у растений с применением изотопа N^{15} 185
Новые данные о механизме фиксации атмосферного азота в клубеньках бобовых растений 200
Фиксация атмосферного азота in vitro ферментными препаратами, выделенными из клубеньков бобовых и из неинфицированных бактериями высших растений 214
Превращение азота в почве по данным исследований с применением изотопа N^{15} 220
Применение изотопа N^{15} в агрономической химии 224
Превращение азотных удобрений в почве и усвоение их растениями 231
Об активном марганце в почве и его токсичности в связи с применением физиологически кислых форм азотных удобрений 242
Использование азотных удобрений урожаем и их превращение в почве 246
Общие вопросы азотного питания растений и применения удобрений 263
Роль минерального и биологического азота в земледелии СССР . . . 263
Питание растений и применение удобрений 285
О целесообразном ассортименте минеральных удобрений 300
Д. Н. Прянишников и проблема азота в земледелии 320
Библиография трудов Ф. В. Турчина 330

1р. 57к.