

УДК 631.811.1:631.421(470)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОТА В ДЛИТЕЛЬНЫХ И КРАТКОСРОЧНЫХ ОПЫТАХ АГРОХИМСЛУЖБЫ И ГЕОСЕТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2020 г. В. А. Романенков<sup>1,2</sup>, М. В. Беличенко<sup>2,\*</sup>, О. В. Рухович<sup>2</sup>,  
Л. В. Никитина<sup>2</sup>, О. И. Иванова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения  
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова. 31а, Россия

\*E-mail: mybelichenko@gmail.com

Поступила в редакцию 10.07.2020 г.

После доработки 28.07.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

На основе баз данных длительных и краткосрочных опытов с удобрениями, расположенных в Нечерноземной зоне Российской Федерации и в Московской обл. на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, а также в Черноземной зоне на черноземах, проведено исследование эффективности использования азота (*NUE*) озимой пшеницей. Сравнили результаты краткосрочных исследований в 1972–1989 гг. и длительных опытов в 2005–2016 гг. с применением комбинированной системы индикаторов азотного питания растений. Установлено, что в диапазоне доз азота 100–150 кг/га/год в длительных опытах и 120–180 кг/га в краткосрочных опытах для дерново-подзолистых почв, 120–150 кг/га для черноземов в минеральной и органо-минеральной системах удобрения обеспечивался оптимальный баланс азота и наиболее полное использование внесенного удобрения растениями. Меньшие дозы азота определяли неустойчивость выноса в связи со значительной зависимостью урожайности от погодных условий и могли приводить к истощению почвы, большие дозы были потенциально опасными как источник загрязнения агроценозов в условиях избытка азота.

*Ключевые слова:* длительные и краткосрочные опыты, азотные удобрения, эффективность использования азота.

DOI: 10.31857/S0002188120120091

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большая потребность сельскохозяйственного производства в удобрениях, особенно в источниках азотного питания растений. Азот практически для всех почв является главным фактором, определяющим продуктивность основных сельскохозяйственных культур, поскольку является одним из важнейших элементов минерального питания растений, при недостатке которого невозможно обеспечить получение полноценного по количеству и качеству урожая сельскохозяйственной продукции [1, 2]. Обеспеченность растений азотом во многом определяет эффективность и устойчивость функционирования агроэкосистем. За последние 50 лет применение N-удобрений увеличилось в 20 раз [3]. Однако избыточное поступление азота приводит к неэффективному использованию азотных удобрений и опасному загрязнению сельско-

хозяйственных и сопряженных с ними ландшафтов. В случае же недостаточного поступления азота происходит истощение почвы за счет ускоренной минерализации органического вещества. Установлено, что “средние величины потерь азота удобрения при выращивании сельскохозяйственных культур составляют 10–59% от применяемой дозы” [4]. Эффективность использования азотных удобрений в мире составляет в среднем 33% для зерновых культур, что указывает на существенный потенциал для ее улучшения посредством совершенствования технологий, прежде всего путем умеренного и эффективного применения азотных удобрений и правильного выбора сортов [3].

В то же время с увеличением доз азотных удобрений эффект последствия, обуславливающий рост доступности азота для последующих культур, возрастает, о чем свидетельствуют накопле-

ние N в почве и большие различия между эффективностью его использования в длительных и краткосрочных полевых опытах [5].

На современном этапе развития агрохимической науки при высоких дозах применения азотных удобрений важнейшей задачей является экологическая оценка их поведения в агроценозах. Анализ литературных данных показал, что для оценки экологической безопасности применения азотных удобрений и повышения эффективности использования азота применяют различные способы. В России используют такие показатели, как величина потребления азота, выражающаяся в абсолютных величинах на единицу площади или продукции, и коэффициент использования растениями азота удобрений [6]. Коэффициент использования растениями азота удобрений определяется в основном разностным методом и с использованием стабильного изотопа [4]. Изотопный метод дает более четкое представление об интенсивности поглощения растениями азота и эффективности азотных удобрений [6]. Однако практическое применение этого метода связано с определенными трудностями, поэтому исследователи более широко применяют коэффициент использования, определенный разностным методом.

В зарубежных публикациях эффективность азотных удобрений оценивают на основе комплекса показателей, требующих как данных контрольных вариантов полевых опытов (агрономическая эффективность, что практически соответствует отечественному показателю окупаемости; эффективность использования азота растениями), так и коэффициентов, позволяющих проводить сравнительные расчеты на основе статистических данных (например, урожайность и вынос урожая азота на единицу внесенного удобрения) [7].

В последнее время в зарубежных исследованиях многие авторы применяют показатель эффективности использования азота (*NUE*), основанный на принципе баланса массы [8–13] для определения экономически оправданных и при этом экологически безопасных доз азотных удобрений. *NUE* дает возможность количественно оценить долю внесенного азота, который использует культура.

Повышение *NUE*, а именно доли внесенного N в составе белковых соединений товарной продукции растениеводства, является одним из наиболее эффективных способов повышения продуктивности сельскохозяйственных культур при одновременном снижении деградации, что учитывается при оценке продовольственной безопасности и качества окружающей среды [14].

*NUE* оказался удобен как показатель эффективности всей продовольственной системы, показывая отношение азота, доступного для потребления в пищу, от общего количества азота, используемого для производства этой пищи [15, 16]. В связи с этим *NUE* предложено использовать в качестве индикатора для оценки прогресса в достижении Целей устойчивого развития ООН [17]. В Российской Федерации данный показатель применяют в исследованиях экологической безопасности животноводческих хозяйств [18, 19].

Цель работы – апробация метода применения *NUE* для почвенно-климатических условий России на основе данных длительных и краткосрочных опытов.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка эффективности использования азота культурами (*NUE*) основана на использовании 3-х индикаторов частичного баланса питательных веществ, а именно суммы поступления азота из основных источников (минеральных удобрений, навоза, пожнивных остатков, зеленого удобрения, биологической фиксации N и др.) и суммы его выноса из системы урожаем и побочной продукцией [8–10].

Отношение этих сумм является первым индикатором эффективности использования азота:

$$NUE, \% = \frac{\sum \text{выносов } N}{\sum \text{поступлений } N} \times 100;$$

Величины *NUE* должны интерпретироваться по отношению к 2-м другим индикаторам:

$$\text{избыток } N = \sum \text{поступлений } N - \sum \text{выносов } N \text{ (кг/га);}$$

$$\text{производительность (урожайность)} = \sum \text{выносов } N \text{ (кг/га).}$$

Авторы отмечают [8–10], что осаждение атмосферного N чаще всего игнорируется в расчетах, так как оно обычно мало по сравнению с сельскохозяйственными поступлениями.

Таким образом, *NUE* отражает долю азота, содержащегося в продуктах питания, в пределах описанной системы относительно количества N, поступающего в систему. *NUE* не учитывает и не описывает минерализацию, нитрификацию или другие пути преобразования N внутри системы и не является количественной оценкой потерь N системы.

В литературе отмечены особенности *NUE*, которые необходимо обязательно учитывать при его интерпретации [10]. Во-первых, сравнивать величины *NUE* для разных хозяйств нужно в соответ-

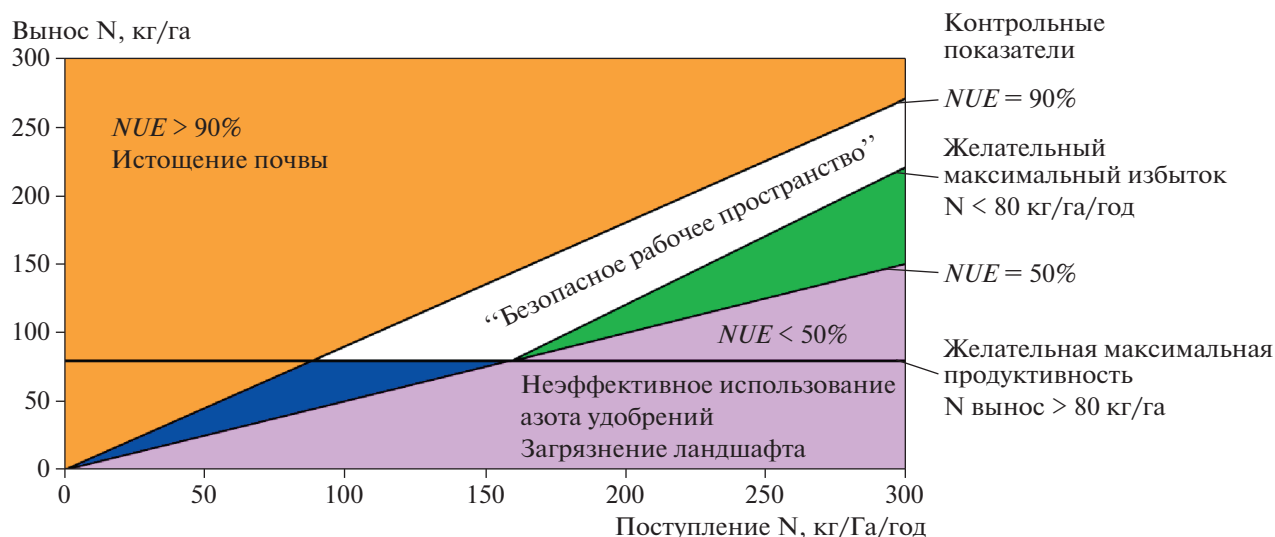


Рис. 1. Концептуальная структура комбинированной системы индикаторов  $NUE$  (приведено по [6, 7] с изменениями).

ствии с культурами. Различные виды культур могут иметь разные величины  $NUE$ , а национальные и региональные показатели  $NUE$  могут отражать конкретное сочетание систем сельского хозяйства в этих областях. Во-вторых, оценку  $NUE$  следует проводить в соответствии с севооборотами. В случае насыщенности севооборотов бобовыми травами или культурами,  $NUE$  необходимо рассчитывать на цикл ротации, чтобы учесть биологическую фиксацию N и N, вносимый бобовыми. Оценки данных величин можно найти в литературе [20]. В-третьих, смешанное использование территории под растениеводство и животноводство требует более сложного учета для оценки  $NUE$ . В данном случае вынос может включать в себя сельскохозяйственные продукты, которые вывозят и не используют полностью внутри хозяйства для корма, а также животноводческая продукция, включая любой навоз, который может быть вывезен, но не использован на месте. В этом случае внесение будет включать в себя минеральные удобрения, навоз, корма и кормовые добавки.

Кроме того, для хозяйства или государства одна величина  $NUE$  за один год не является исчерпывающе информативной. Оптимальной является оценка тенденции к изменению  $NUE$  с течением времени. В этом случае можно понять, будет ли достигнуто улучшение  $NUE$  в рамках данной системы земледелия, обусловленное климатом, почвами и хозяйственными условиями региона.

Несмотря на эти проблемы, все 3 индикатора:  $NUE$ , производительность и избыток N имеют важное значение для оценки наличия достаточ-

ного количества питательных веществ для получения высоких урожаев и для поддержания или даже улучшения состояния почвы.

Интерпретировать показатель  $NUE$  не сложно. Например,  $NUE = 1$  показывает, что количество удаляемого из системы азота равно поступающему N. Это самый желательный вариант ведения хозяйства, когда все затраты на удобрения окупаются урожаем.  $NUE > 1$  указывает на превышение выноса N урожаем над его поступлением. В этом случае при длительном сохранении такой ситуации происходит извлечение питательных веществ из почвы и истощение ее плодородия.  $NUE < 1$  свидетельствует о том, что внесение N превосходит его вынос. Азот, не вынесенный в результате сбора урожая, может сохраняться в почве или удаляться из нее другими путями. Переход азота, поступившего с удобрениями, в запасы почвенного азота – процесс длительный и малоинтенсивный, поэтому низкие величины  $NUE$  указывают на большую вероятность вымывания его в грунтовые воды и загрязнение экосистемы.

Если поступление азота можно полностью контролировать, то его вынос определяется величиной урожая и уровнем содержания азота в нем, что зависит от многих условий, в частности, не поддающихся контролю, и по большей части связанных с погодными особенностями года, поэтому достичь  $NUE = 1$  можно только при определенном стечении обстоятельств.

При графическом способе оценки эффективности сельскохозяйственного производства все 3 индикатора представлены на диаграмме поступления–выноса (рис. 1). Для этого всем 3-м индикатора

Таблица 1. Места проведения длительных опытов, вошедших в исследование

Учреждение	Область/рай-он	Год закладки опыта	Почва	Севооборот	Ссылка на электронный паспорт опыта
Костромской НИИСХ	Костромская обл., Костромской р-н	1978	Дерново-подзолистая	Зерно-пропашной	
Владимирский НИИСХ ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”	Владимирская обл., Суздальский р-н	1991	Дерново-подзолистая	Зерновой (полевой)	<a href="http://www.geoset.ru/ishop/2/227">http://www.geoset.ru/ishop/2/227</a>
ВНИИОУ ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”	Владимирская обл. Судогодский р-н	1968	Дерново-подзолистая	Зерно-травяно-пропашной (полевой)	<a href="http://www.geoset.ru/ishop/2/130">http://www.geoset.ru/ishop/2/130</a>
Брянская ГСХА	Брянская обл., Выгоничский р-н	1983	Серая лесная	Зерно-травяно-пропашной (полевой)	<a href="http://www.geoset.ru/ishop/2/154">http://www.geoset.ru/ishop/2/154</a>
Рязанский НИИСХ	Рязанская обл., Рязанский р-н	1992	Серая лесная	зерновой	<a href="http://www.geoset.ru/ishop/2/113">http://www.geoset.ru/ishop/2/113</a>
Белгородский НИИСХ	Белгородская обл., Белгород	1986	Чернозем	Зерно-травяной (полевой)	<a href="http://www.geoset.ru/ishop/2/149">http://www.geoset.ru/ishop/2/149</a>
Курский НИИ АПП	Курская обл., Курский р-н	1964	Чернозем	Зерно-травяно-пропашной (полевой)	<a href="http://www.geoset.ru/ishop/2/137">http://www.geoset.ru/ishop/2/137</a>
Тамбовский НИИСХ	Тамбовская обл., Ржаксинский р-н	1971	Чернозем	Зерно-пропашной (полевой)	<a href="http://www.geoset.ru/ishop/2/221">http://www.geoset.ru/ishop/2/221</a>
ВНИИ сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова	Воронежская обл.	1935	Чернозем	Зерно-травяно-пропашной (полевой)	<a href="http://www.geoset.ru/ishop/2/138">http://www.geoset.ru/ishop/2/138</a>

торам присваивают определенные контрольные величины, т.е. желаемые и достижимые величины производительности (N выноса) – 80 кг/га, эффективности использования ресурсов (*NUE*) – от 50 до 90% и риска загрязнения окружающей среды (максимальный допустимый избыток N) – 80 кг/га. Величина контрольных величин зависит от почвы, климата и культуры.

В качестве примера на диаграмме величина N выноса дана как 80 кг/га, эффективность использования ресурсов (*NUE*) – от 50 до 90% и риск загрязнения окружающей среды (максимальный допустимый избыток N) – 80 кг/га.

Диапазон наилучшей эффективности использования азота располагается между *NUE* = 50 и 90%, более низкие величины (*NUE* < 50%) приводят к неоправданным затратам и загрязнению, а *NUE* > 90% в долгосрочной перспективе может привести к истощению почвы. Горизонтальная линия показывает желаемый минимальный уровень урожайности (черная область). Дополнительная диагональ определяет максимальный из-

быток азота, при котором возможно избежать его потери (темно-серая область). Контрольные величины служат для ограничения приоритетной области внесения азотных удобрений, или “безопасного рабочего пространства”, которая заключена между прямыми *NUE* = 90%, N вынос = 80 кг/га/год и N избыток = 80 кг/га/год (белая область). Показатели выносов азота урожаем, попадающие в эту зону, одновременно имеют высокую эффективность использования азота и высокую урожайность, при этом избыток N находится на низком уровне.

На основе оценки эффективности использования азота проведено исследование систем растениеводческого производства на основе урожайности озимой пшеницы по базам данных длительных и краткосрочных опытов агрохимслужбы и Геосети “Агрогеос” [21, 22]. В исследование включены длительные опыты, расположенные в Нечерноземной и Черноземной зонах Российской Федерации, охватывающие ареал распространения дерново-подзолистых, серых лесных

**Таблица 2.** Эффективность использования азота в длительных опытах Геосети в Нечерноземной зоне

Поступление N, кг/га	Урожайность, ц/га	Вынос N, кг/га	<i>NUE</i> , $N_{\text{вынос}} : N_{\text{поступление}}$	Избыток N, кг/га
0	4.8–35.2	30–90	–	–30...–90
30	11–34.1	40–93	1.25–2.74	–8...–59
40	39.6–66.7	108–129	2.70–3.23	–68...–89
50	32.3–40.9	69–130	1.33–2.60	–17...–80
60	12.1–26.8	42–75	0.66–1.17	–11...22
90	38.0–66.7	76–134	0.84–1.74	–59...14
100	19.3–36.6	81–131	0.65–1.26	–27...23
150	25.8–53.3	73–194	0.48–1.29	–44...59
200	37.7–49.8	83–102	0.4–0.49	106–125
250	43.8–68.2	123–134	0.5–0.54	114–125
300	41.9–59.2	110–118	0.37–0.39	182–190
350	45.4–69.9	126–139	0.36–0.40	211–224
400	43.6–59.2	111–122	0.28–0.31	278–289
450	44.1–69.1	125–135	0.28–0.29	315–325
500	50.0–72.6	147–151	0.29–0.30	349–353

почв и черноземов (табл. 1). Для Нечерноземной зоны обработаны данные 221 варианта опытов с озимой пшеницей за 12 лет исследований (2005–2016 гг.) с минеральной и органо-минеральной системами удобрения, обеспечивающими ежегодное внесение от 0 до 500 кг N/га и выносом от 29 до 179 кг N/га. Для Черноземной зоны обработаны 75 вариантов опытов с 2005 по 2015 гг. исследований с дозами удобрений от 0 до 300 кг N/га и выносом от 74 до 180 кг N/га.

Кроме того, в исследовании были использованы данные урожайности озимой пшеницы в 225 вариантах краткосрочных опытов из базы данных Агрохимслужбы и Геосети “Агрогеос”, расположенных на дерново-подзолистых почвах в Московской обл., за период 1972–1989 гг. [21, 22].

Проведена оценка 3-х индикаторов эффективности использования азота озимой пшеницей, результаты представлены в табличной и графической форме. Данные об урожайности пшеницы, побочной продукции и содержании азота в них пересчитаны в вынос азота урожаем (табл. 2).

Исследовали поступление N с удобрениями до дозы 150 кг/га для минеральной и до 500 кг/га – для органо-минеральной системы удобрения.

Низкие дозы азота (40 кг/га) (табл. 2) могут обеспечить относительно высокий урожай при

благоприятных погодных условиях, однако приводят к значительному дефициту азота в системе почва–растение. Баланс азота является дефицитным до доз N90. До дозы N60 вынос значительно превышает поступление, недостаток азота составляет 28–79 кг/га. Внесение до N100 приводит к некомпенсированному выносу азота из почвы растениями – *NUE* >90%. При поступлении N100 эффективность использования N приближается к единице, а после N150 поступление азота превышает вынос, эффективность использования азота становится значительно <1, с избытком 35–350 кг N/га. Внесение с удобрениями более 150 кг N/га создает избыток элемента, который не используется растениями на формирование урожая, а приводит к избыточному содержанию азота в почвах и сопредельных средах. Органо-минеральная система удобрения не обеспечивала ожидаемый рост урожайности при дозах азота более 250 кг/га. Очень высокие дозы азота, поступающие с навозом, производят очень большой избыток данного элемента в почве, но не катастрофического для окружающей среды, поскольку дозы >150 кг N/га обеспечены внесением навоза, азот которого мало подвижен, сохраняется в почве и обеспечивает элементами питания следующие культуры в течение времени последствия.

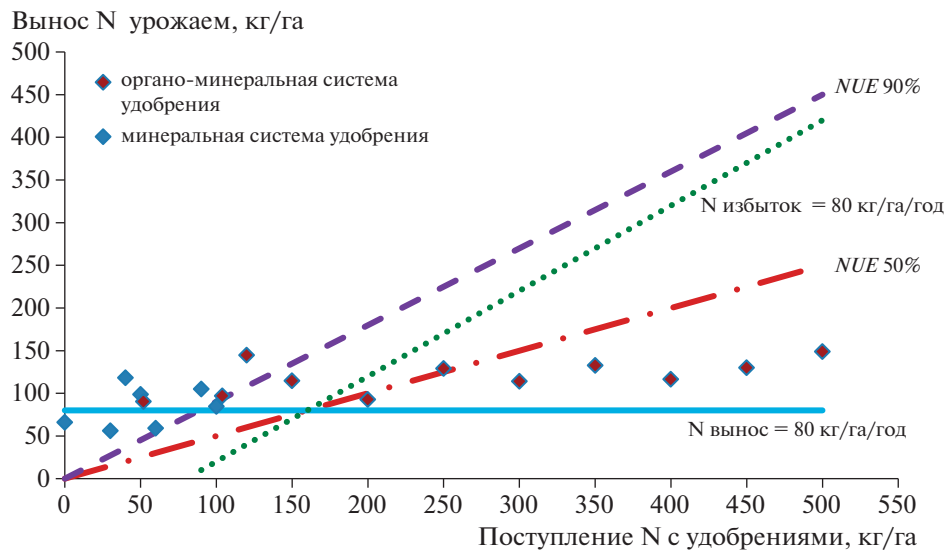


Рис. 2. Вынос азота урожаем озимой пшеницы в длительных опытах Геосети в Нечерноземной зоне РФ (2005–2016 гг.).

При применении  $<N100$  неопределенность, создаваемая изменчивостью погодных условий, не позволяет достичь устойчивого управления азотным балансом. В диапазоне доз 100–150 кг N/га в минеральной и органо-минеральной системах удобрения в длительных опытах обеспечивается оптимальный баланс азота и наиболее полное использование внесенного азота растениями, при изменении урожайности в пределах 2.9–7.3 т/га и среднего содержания азота в продукции 2.0%.

Графический способ представления данных наглядно показывает, как производителю получить максимальный эффект от применения азотных удобрений и не нанести вреда агроландшафту.

Если представить данные в графической форме с усреднением по дозам и по годам, в длительных опытах, проведенных в Нечерноземной зоне на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, становится очевидно, что с некоторыми изменениями *NUE* снижается с повышением дозы азота, внесенного с удобрениями (рис. 2).

Величина *NUE*, значительно превышающая 90% при низких дозах применяемых удобрений, указывает на преимущественно почвенный источник N, поскольку она не могла быть обеспечена атмосферными выпадениями. Скорее всего, достаточная величина влажности дерново-подзолистых почв в течение вегетации озимой пшеницы способствует минерализации органического вещества почвы как источника N. Обращает внимание также значительная вариабельность этого показателя по годам исследования, связанная с зависимостью урожая от погодных условий и соответствующим изменением выноса N. Это ва-

рирование остается значительным (60–75 кг/га) для всех вариантов опытов, где доза удобрений является недостаточной для формирования урожая как в случае применения минеральной, так и органо-минеральной систем удобрения. Заметное снижение (20–25 кг/га) происходит при поступлении  $>100$  кг N/га, т.е. при росте эффективности использования N удобрений. Ранее при анализе выборок длительных опытов, проводимых в Московской (26 лет) и Владимирской (15 лет) обл. было показано, что при дозах азотных удобрений  $<60$  кг/га варьирование прибавки урожая озимой пшеницы и окупаемость N-удобрений определяются преимущественно влиянием погодных условий, а при дозах  $>90$  кг N/га становятся сопоставимыми с влиянием окультуренности [23]. Проведенное исследование обнаруживает снижение варьирования эффективности доз N-удобрений по мере возрастания доз. Полученный результат согласуется также с исследованием эффективности использования N-удобрений в опыте Брудбалк, Ротамстед, где “безопасное рабочее пространство” достигалась при дозах N удобрений 100–200 кг N/га [10]. Вместе с тем, в отличие от опыта Брудбалк, где наблюдали междугодовой рост варьирования выноса N с увеличением доз, обратная зависимость для нашей выборки, по-видимому, отражает более универсальную роль роста эффективности использования N в стабилизации урожая, что делает перспективным усреднение результатов серии длительных опытов для оценки возможности увеличения устойчивости урожаев. Рост выноса N с ростом доз  $>50$  кг N/га, достигающий в отдельные годы

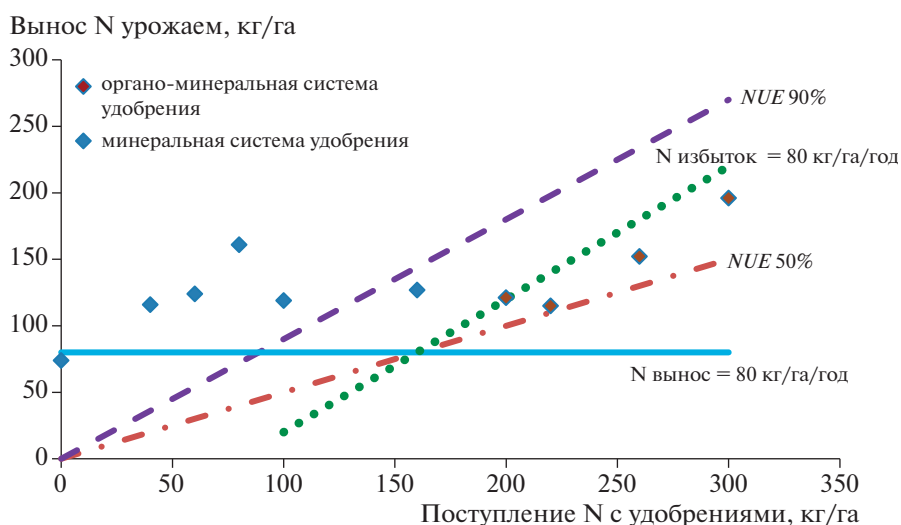


Рис. 3. Вынос азота урожаем озимой пшеницы в длительных опытах Черноземной зоны РФ (2005–2015 гг.).

максимальных величин 200 кг/га при дозе 150 кг/га, свидетельствует о возможности рассмотрения  $NUE > 90\%$  как оптимальных в условиях значительной роли процессов минерализации в обеспечении запасов минерального N. Можно отметить, что при сравнении одинаковых доз вынос N в минеральных системах был больше, чем в органо-минеральных, что свидетельствует не только о меньшей доступности N, внесенного с органическими удобрениями в многолетнем ряду данных, но и о меньшем влиянии последствия внесенного органического N, что может быть результатом активной конкуренции микроорганизмов почвы за минерализуемый N.

Для усредненных по годам и дозам данных опытов в Черноземной зоне получено похожее распределение выносов азота по областям диаграммы (рис. 3). До количества 100 кг N/га из удобрений создание урожая происходит за счет запасов этого элемента в почве. В “безопасное рабочее пространство” попадают дозы удобрений 120–150 кг N/га. Более высокие дозы до 300 кг N/га, обеспеченные в опытах с органо-минеральной системой удобрения, попадают в область между избытком N 80 кг/га/год и  $NUE = 50\%$ , что показывает их небольшую, но неопасную избыточность.

В отличие от рассмотренных опытов в Нечерноземной зоне, где при дозе N < 60 кг/га вынос N в среднем был отмечен для большинства случаев на уровне 50 кг/га, в длительных опытах на черноземах вынос достигал 80 кг N/га в контрольных вариантах, что характеризует сравнительно более высокий уровень почвенного плодородия черноземов. Вместе с тем при росте доз значительного

увеличения выноса N не происходит, он стабилизируется на уровне 120–130 кг/га в широком диапазоне вариантов, что отражает влияние роста засушливости по сравнению с Нечерноземной зоной в снижении выноса N озимой пшеницей. Прирост выноса в минеральной системе удобрения составил 60 кг N/га при дозах N < 160 кг/га и 100 кг/га — в органо-минеральной системе при дозах N > 250 кг/га.

Вариабельность эффективности удобрений по годам исследования была выше наблюдаемой в Нечерноземной зоне (120–150 кг/га), возрастая с увеличением доз N. Таким образом, в условиях черноземов прием увеличения доз N-удобрений больше средних не приводит к стабилизации урожая, что выявляется при сравнении результатов длительных опытов в одном временном интервале. Значительное варьирование было обусловлено погодными условиями, особенно уменьшением урожаев в 2010 г. на 17–65% по сравнению с предыдущим годом для зернопроизводящих регионов Европейской территории России, что было связано с наиболее сильной за последние 60 лет атмосферной засухой [24].

Для краткосрочных опытов в Московской обл. обнаружены закономерности распределения выносов азота, несколько отличающиеся от современных длительных опытов (рис. 4): при наблюдаемой меньшей урожайности вынос N отмечен в пределах 100–130 кг/га при дозах N < 175 кг/га, в то время как в длительных опытах такая величина выноса обеспечивалась дозами > 100 кг/га. В то же время при дозе N < 60 кг/га вынос N в среднем оставался < 80 кг/га. В результате в рамки оптимальных величин попадают показатели выноса

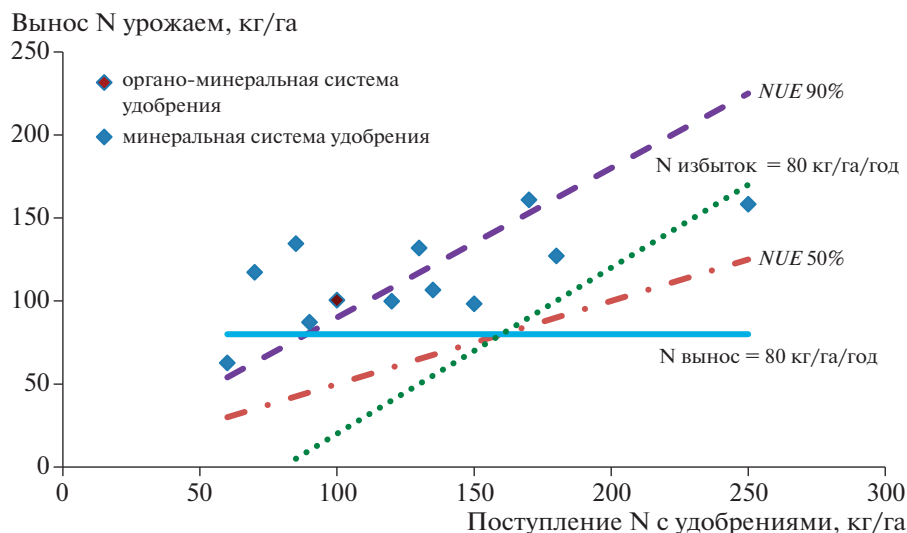


Рис. 4. Вынос азота урожаем озимой пшеницы в краткосрочных опытах в Московской обл. (1972–1989 гг.).

азота урожаем при внесении азота удобрений от 120 до 180 кг/га, эффективность внесения 240 кг N/га вызывает некоторый, но не опасный, его избыток в агроценозе. Данный диапазон достигался при варьировании урожайности 1.1–5.2 т/га и среднего содержания азота в продукции 2.26%.

Данные результаты свидетельствуют, что в условиях Нечерноземной зоны при возделывании озимой пшеницы “безопасное рабочее пространство” требует внесения 100–120 кг N/га для гарантированного предотвращения истощения почвы. В реальных условиях в зависимости от N-минерализующей способности почвы данные рекомендованные дозы могут снижаться.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа результатов длительных и краткосрочных опытов на территории Нечерноземной зоны РФ установлено, что наиболее сбалансированный результат относительно затрат на удобрения, отклика на них в виде урожая и безопасности для окружающей среды дают дозы азота при органо-минеральной системе удобрения – 100–150 кг N/га/год, при минеральной системе удобрения – 120–180 кг N/га/год. Для Нечерноземной зоны эффективность использования азота озимой пшеницей при более низких дозах может превышать 90% при значительной роли процессов минерализации в обеспечении запасов минерального N. Для длительных опытов на черноземных почвах безопасной дозой является 120–150 кг N/га/год. При сравнении одинаковых доз вынос N в минеральных системах был больше по сравнению с органо-минеральными

как в опытах на черноземах, так и в Нечерноземной зоне.

Предложенная система индикаторов азотного питания растений и ее графическая форма представления позволяет одновременно оценить способ ведения сельскохозяйственного производства по 3-м важным параметрам: эффективности использования азота, величине урожайности и влиянию на окружающую среду. Различные дозы внесения азотных удобрений, применяемые в длительных и краткосрочных опытах под озимую пшеницу, показали, что неблагоприятные последствия могут быть вызваны как слишком низкими, так и слишком высокими дозами азота. Добиться более рационального использования азотных удобрений и устойчивого развития хозяйства можно с помощью прогрессивных методов ведения сельского хозяйства, таких, как точное земледелие, севооборот и тестирование азотного питания во время вегетации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудяров В.Н. Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // *Агрохимия*. 2018. № 10. С. 3–11.
2. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П. *Агрохимия. Учебник* / Под ред. Минеева В.Г. М.: ВНИИА, 2017. 854 с.
3. Verhulst N., Francois I., Grahmann K., Cox R., Govaerts B. Nitrogen use efficiency and optimization of nitrogen fertilization in conservation agriculture // *CAB Reviews*. 2013. V. 8. № 053. P. 1–19. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20138053>
4. Завалин А.А., Соколов О.А. Поток азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 596 с.



5. *Castellano M.J., David M.B.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils is not necessarily related to nitrate leaching from agricultural soils // *Proceed. National Acad. Sci. USA (PNAS)*. 2014. V. 111(8). E766. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321350111>
6. *Завалин А.А., Соколов О.А.* Коэффициент использования растениями азота удобрений и его регулирование // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2019. № 4(370). С. 71–75. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-14070>
7. *4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, Metric Version / Ed. Bruulsema W., Fixen P.E., Sulewski G.D.* Norcross, GA, USA: International Plant Nutrition Institute, 2012. 150 p.
8. *Norton R., Davidson E., Roberts T.* Nitrogen use efficiency and nutrient performance indicators. GPNM Task Team Report and Recommendations. Technical Paper. 2015. 14 p. [https://mafiadoc.com/nitrogen-use-efficiency-and-nutrient-performance-indicators-gpnm-\\_59b1e9551723ddd7c686d684.html](https://mafiadoc.com/nitrogen-use-efficiency-and-nutrient-performance-indicators-gpnm-_59b1e9551723ddd7c686d684.html)
9. *Brentrup F., Lammel J.* Nitrogen Use Efficiency, Nitrogen balance, and Nitrogen productivity – a combined indicator system to evaluate Nitrogen use in crop production systems. *Proceedings of the 2016 International Nitrogen Initiative Conference, “Solutions to improve nitrogen use efficiency for the world”*, 4–8 December 2016, Melbourne, Australia, [www.ini2016.com](http://www.ini2016.com)
10. EU Nitrogen Expert Panel. Nitrogen Use Efficiency (NUE) – an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems. Wageningen University, 2015. Alterra, PO Box 47, NL-6700 Wageningen, Netherlands.
11. *Sutton M.A., Bleeker A., Howard C.M.* Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. UK, Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology, 2013. 128 p.
12. *Dobermann A.* Nutrient use efficiency – measurement and management // *Fertilizer best management practices. General principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices*. 2007. Brussels, Belgium, P. 1–28.
13. *Omara P., Aula L., Oyebiyi F., Raun W.R.* World Cereal Nitrogen Use Efficiency Trends: Review and Current Knowledge // *Agrosyst. Geosci. Environ.* 2019. 2:180045. <https://doi.org/10.2134/age2018.10.0045>
14. *Zhang X., Davidson E.A., Mauzerall D.L., Searchinger T.D., Dumas P., Shen Y.* Managing nitrogen for sustainable development // *Nature*. 2015. V. 528 (7580). P. 51–59. DOI: hal-01262089 <https://doi.org/10.1038/nature15743>
15. *Erismann J.W., Leach A., Bleeker A., Atwell B., Cattaneo L., Galloway J.* An integrated approach to a nitrogen use efficiency (NUE) indicator for the food production-consumption chain // *Sustainability (Switzerland)*. 2018. V. 10 (4). P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/su10040925>
16. *Isermann K., Isermann R.* Food production and consumption in Germany: N flows and N emissions // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 1998. V. 52. P. 289–301. <https://doi.org/10.1023/A:1009706001900>
17. *The Sustainable Development Goals Report.* UN. 2019. N.Y., <https://doi.org/10.18356/55eb9109-en>
18. *Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Обломкова Н.С.* Методика оценки экологической устойчивости сельских территорий // *Технол. и техн. средства мех. произв-ва продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 3 (96). С. 164–175. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10070>
19. *Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Козлова Н.П., Обломкова Н.С.* Система показателей машинных технологий для достижения экологической устойчивости сельских территорий при производстве животноводческой продукции // *Технол. и техн. средства мех. произв-ва продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 3 (96). С. 156–163.
20. *Salvagiotti F., Cassman K.G., Specht J.E., Walters D.T., Weiss A.* Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review // *Field Crops Res.* 2008. V. 108. P. 1–13.
21. *Рухович О.В., Беличенко М.В., Романенков В.А., Никитина Л.В., Листова М.П., Шевцова Л.К., Хайдуков К.П., Чистотин М.В., Беляева Н.К.* База данных длительных опытов Геосети по урожайности сельскохозяйственных культур качеству земель в Центральном федеральном округе (дерново-подзолистые почвы) Свид-во о регистрации базы данных RU 2015621414, 15.09.2015. Заяв. № 2015621050 от 06.08.2015.
22. *Рухович О.В., Беличенко М.В., Романенков В.А., Никитина Л.В., Листова М.П., Шевцова Л.К., Хайдуков К.П., Чистотин М.В., Беляева Н.К.* База данных длительных опытов Геосети по урожайности сельскохозяйственных культур и качеству земель в Центральном федеральном округе (черноземы и серые лесные почвы) Свид-во о регистрации базы данных RU 2015621610, 29.10.2015. Заяв. № 2015621051 от 06.08.2015.
23. *Сиротенко О.Д., Романенков В.А., Павлова В.Н., Листова М.П.* Оценка и прогноз эффективности минеральных удобрений в условиях изменяющегося климата // *Агрохимия*. 2008. № 7. С. 26–33.
24. *Фролов А.В., Страшная А.И.* О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // *Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года: Сб. тр. М.: Триада ЛТД*, 2011. С. 22–31.

## Nitrogen Use Efficiency in Long-Term and Short-Term Experiments in the Russian Federation

V. A. Romanenkov<sup>a,b</sup>, M. V. Belichenko<sup>b,#</sup>, O. V. Rukhovich<sup>b</sup>, L. V. Nikitina<sup>b</sup>, and O. I. Ivanova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science  
Leninskie Gory 1, bld. 12, GSP-1, 119991 Moscow, Russia*

<sup>b</sup> *D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry  
ul. Pryanishnikova 31A, Moscow 127550, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: mvbelichenko@gmail.com*

A study of the Nitrogen Use Efficiency (*NUE*) in winter wheat was carried out using a combined set of nitrogen crop nutrition indicators. For the study the databases of long-term and short-term experiments with fertilizers located in the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation and in the Moscow Region on sod-podzolic soils and in the Chernozem Zone on chernozems were used. The results of short-term trials in 1972–1989 and long-term experiments in 2005–2016 were compared. It was found that the optimal nitrogen balance and the most efficient use of fertilizer by crops is ensured by nitrogen rates in the range of 100–150 kg ha<sup>-1</sup> · year<sup>-1</sup> in long-term experiments and 120–180 kg · ha<sup>-1</sup> in short-term experiments for sod-podzolic soils, 120–150 kg ha<sup>-1</sup> for chernozems in the mineral and organic-mineral fertilizer system. Lower nitrogen rates cause the instability of uptake due to the significant crop-weather dependence and can lead to soil mining; higher rates are potentially dangerous as a source of nitrogen pollution of agrocenoses. A decrease in N uptake variability for higher rates may reflect the prospect of averaging the results of a series of long-term experiments to assess the possibility of managing yield sustainability with this approach.

*Key words:* long-term and short-term experiments, nitrogen fertilizers, Nitrogen Use Efficiency (*NUE*).