

Выводы

Во многих системах земледелия трудно увеличить содержание ОВ в почве без внесения значительных количеств органических удобрений. Однако необходимо делать все возможное для сохранения и увеличения содержания ОВ в почве, потому что оно улучшает структуру почвы и, следовательно, повышает способность корней растений распространяться в почве в поисках элементов питания, необходимых для нормального роста и развития растений и достижения высокой урожайности. Это особенно важно для поглощения азота и фосфора растениями и, соответственно, более эффективного использования азотных и фосфорных удобрений в сельском хозяйстве.

Дж. Джонстон – старший научный сотрудник фонда Лоуса, Ротамстедская опытная станция, Великобритания (Lawes Trust, Rothamsted Research, Harpenden, UK. AL5 2JQ). E-mail: johnny.johnston@rothamsted.ac.uk

Настоящая статья основана на публикации: Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. A.E. Johnston, P.R. Poulton, and K. Coleman. 2009. *Advances in Agronomy* 101:1-57.

Литература

Garner, H.V. and G.V. Dyke. 1969. *Rothamsted Experimental Station Report for 1968, Part 2*, 26-49.

Johnston, A.E., P.R. Poulton, and K. Coleman. 2009. *Advances in Agronomy* 101, 1-57.

Перевод статьи и адаптация – к.б.н. Иванова С.Е. – вице-президент МИПР по Восточной Европе, Центральной Азии и Ближнему Востоку.

Переводчик выражает благодарность региональному директору Международного института питания растений по Югу и Востоку России Носову В.В. за ценные замечания.

Новый подход к оценке эффективности использования фосфора из удобрений в сельском хозяйстве

А.Е. Джонстон, Дж. К. Сайерс

Часто утверждают, что фосфор неэффективно применяется в сельском хозяйстве, и коэффициент эффективности использования фосфора из удобрений растениями обычно составляет от 10 до 20%. Мы утверждаем, что такая низкая эффективность является в значительной степени артефактом, связанным с методом расчета. При расчете показателя эффективности «балансовым методом» с учетом выноса фосфора с урожаем, выраженного в процентах от внесенного фосфора, а также при условии, что содержание доступного фосфора в почве поддерживается около критического уровня, эффективность использования фосфорных удобрений часто превышает 90%.

В недавнем исчерпывающем обзоре мировой литературы по эффективности применения фосфорных удобрений в различных системах земледелия, климатических условиях и на разных типах почв Сайерс с соавт. (Syers et al., 2008) показали, что эффективность использования фосфора из минеральных удобрений с учетом последствий часто составляет от 50 до 90% при расчете соответствующим методом с учетом времени последствий удобрений. В настоящей статье показано, как подходы, описанные в обзоре, могут быть развиты в дальнейшем.

Эффективный коэффициент использования элемента питания из удобрения $K_{эф}$ (%) часто определяется разностным методом – отношением разности в выносе данного элемента с урожаем в вариантах опыта с удобрением и контрольным (без удобрений) к количеству вносимого в почву с удобрением элемента питания:

$$*K_{эф} = \frac{(B_y - B_0)}{Y_d} * 100\%$$

* название показателя дано переводчиком Ивановой С.Е. Данный коэффициент соответствует коэффициенту использования питательных веществ из удобрений (КИУ), определенного разностным методом с учетом фактического выноса.

$K_{эф}$ – эффективный коэффициент использования элемента питания из удобрения, %

B_y – вынос элемента питания с урожаем с учетом побочной продукции на удобренном участке, кг/га

B_0 – вынос элемента питания с урожаем с учетом побочной продукции на контрольном (неудобренном) участке, кг/га

Y_d – количество элемента питания, внесенное с удобрениями (доза удобрения), кг д.в./га

Хотя этот метод обычно хорошо применим для азотных удобрений, для фосфора и калия он имеет некоторые ограничения. Почему? Азот, внесенный в форме минеральных удобрений, содержащих карбамид, аммоний или нитрат, и не использованный растениями, редко остается в почве в исходном виде. Нитраты, оставшиеся в почве после уборки урожая, вымываются из почвенного профиля. При денитрификации происходит восстановление нитратного азота до молекулярного азота или оксидов азота, и их улетучивание. Газообразные потери азота происходят также в виде аммиака. Таким образом, рассчитывать коэффициент эффективности ис-

пользования азота из внесенного удобрения лучше всего разностным методом, который учитывает весь азот, поглощенный растением без внесения удобрения. Однако при внесении фосфорных и калийных удобрений потери питательных элементов из неиспользованных удобрений если и происходят, то незначительны. Остаточные количества фосфора и калия из удобрений формируют запасы этих элементов в почве.

Для оценки эффективности использования фосфора из минеральных удобрений может быть применен прямой метод исследования с использованием изотопа ^{32}P . Однако, значения коэффициента эффективности использования фосфора из минеральных удобрений, определенные этим методом, редко превышают 25%. Давайте остановимся и подумаем. Если только 25% фосфора поглощено растениями из недавно внесенного удобрения, то остальные 75% должны поступать из запасов фосфора в почве. А если содержание фосфора в почве должно поддерживаться на постоянном уровне, любая потеря из запасов элемента должна быть восполнена. Так, логично предположить, что общий фосфор в растении, поглощенный частично из удобрения и частично из почвенного запаса, который поддерживается внесением фосфорного удобрения, представляет собой элемент, поступавший из фосфорного удобрения в течение длительного времени. Этот подход для измерения эффективности использования фосфора был предложен Джонстоном и Пултоном (Johnston and Poulton, 1977) и развит впоследствии Сайерсом с соотр. (Syers et al., 2008), назвавшими его «балансовым методом». В этом методе в качестве показателя эффективности использования питательного вещества из удобрения рассчитывают коэффициент выноса элемента питания:

$$*K_B = \frac{V_y}{U_d} * 100\%$$

K_B – коэффициент выноса элемента питания, %

V_y – вынос элемента питания с основной и побочной продукцией, кг/га

U_d – доза удобрения, кг д.в./га.

Преимущество данного метода в том, что он учитывает поступление фосфора и из почвенного запаса, а также не требует закладки контрольных делянок в опытах.

Другой аспект оценки эффективности использования фосфорных удобрений связан с развитием представлений о поведении фосфора в почве. Джонстон (Johnston, 2001) предположил существование четырех пулов фосфора в почве, различающихся по степени доступности для растений. Эта концепция была позднее развита Сайерсом с соотр. (Syers et al., 2008). Наряду с характеристикой четырех пулов фосфора по степени доступности элемента для растений, они связали пулы фосфора со степенью его экстрагируемости химическими реагентами. Таким образом, данные о содержании доступного фосфора в почвенных образцах, получен-



Рис. 1. Пулы фосфора в почве по степени экстрагируемости рутинными методами определения и доступности растениям

ные в лаборатории, могут быть использованы для оценки его доступности для растущего в поле растения. Общая концепция показана на диаграмме (рис. 1).

Количество фосфора в каждом из четырех пулов зависит от энергии связи фосфора с адсорбционными центрами как на поверхности, так и внутри частиц твердой фазы почвы, способных удерживать фосфор, и от количества таких центров в почвенной матрице. Для наименее доступного пула предполагается, что фосфор может вступать в другие реакции с компонентами почвы (Syers et al., 2008). Фосфор поглощается корнями растений в виде ортофосфат-ионов, главным образом, ионов H_2PO_4^- , и в меньшей степени ионов HPO_4^{2-} . Согласно прежним представлениям о трансформации фосфора, внесенного с удобрением, если этот элемент не был использован растением, то он закрепляется в почве в виде труднорастворимых соединений и становится недоступным для корней растений. Однако к 50-м годам 20-го века были получены данные полевых опытов, показывающие, что если благодаря внесению минеральных удобрений и навоза в прошлом был создан большой запас фосфора в почве, то этот резерв мог обеспечить растения достаточным количеством фосфора для повышения урожайности.

Наиболее важный момент, показанный на рис. 1 – это обратимость перехода фосфора из почвенного раствора, в пул легкодоступного фосфора и пул менее доступного фосфора. Примеры, подтверждающие данные полевых опытов, описаны Сайерсом с соотр. (Syers et al., 2008). При определении содержания доступного фосфора в лаборатории в вытяжку переходит фосфор почвенного раствора и фосфор из легкодоступного для растений пула. Поскольку эта фракция почвенного фосфора выделена исходя именно из метода химического анализа почвы, используемый экстрагент не имеет значения. Главное, чтобы полученные данные точно характеризовали обеспеченность почвы фосфором и отзывчивость растений на внесение фосфорных удобрений.

Обратимый переход фосфора между тремя первыми пулами подразумевает установление равновесия между ними. В длительных опытах на тяжелосуглинистой почве в Ротамстеде, легкосуглинистой почве в Уберне и опесчаненной тяжелосуглинистой почве в Саксмундхаме были получены данные, показывающие увеличение содержания как доступного для растений фосфора (определенного по методу Олсена), так и общего фосфора в верхнем слое почвы 0-23 см. Для всех трех типов почв наблюдалась линейная зависимость между содержанием доступного и общего фосфора. (рис. 2).

Аналогичным образом, в опыте, проведенном в Се-

* название показателя дано переводчиком Ивановой С.Е. В русскоязычной литературе аналогичный коэффициент иногда называют «балансовый коэффициент использования».

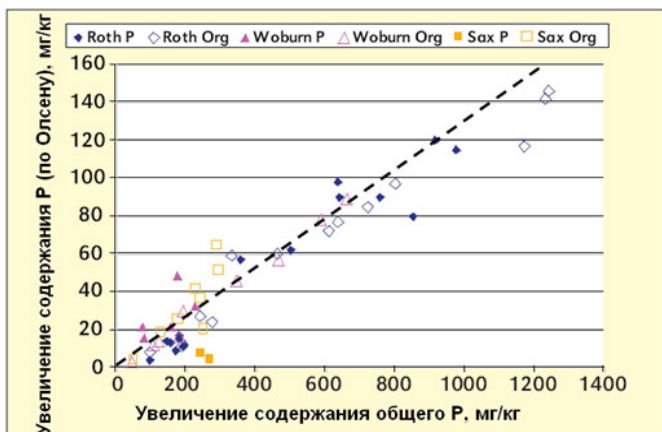


Рис. 2. Зависимость между содержанием общего и доступного фосфора по Олсену (Пунктирная линия соответствует содержанию остаточного фосфора, равному 13% от добавленного фосфора)



Рис. 3. Сколько фосфора должно содержаться в легкодоступном пуле?

верной Каролине, Макколлум (McCollum, 1991) показал, что после внесения фосфорного удобрения в течение 9 лет в суммарной дозе до 1128 кг P/га лишь около 20% фосфора экстрагировалось методом Мелиха-1 (0.05M HCl + 0.0125M H₂SO₄).

Данная концепция, описывающая поведение фосфора в почве и трансформацию фосфора удобрений, вызывает ряд практических вопросов.

Первый вопрос: Какое содержание легкодоступного фосфора в почве может обеспечить оптимальную урожайность?

На графиках зависимости урожайности культуры от содержания доступного фосфора в почве, определенном адекватным аналитическим методом, сначала урожайность растет быстро, а потом медленнее до тех пор, пока не достигнет плато – асимптотического уровня (рис. 3). Содержание доступного фосфора в почве, при котором достигается асимптотический уровень урожайности, может считаться критическим уровнем для данной культуры. Содержание доступного фосфора ниже этого критического уровня приводит к недобору урожая. Внесение фосфорных удобрений в почву с содержанием доступного фосфора выше этого критического значения необходимо только для того, чтобы поддерживать содержание доступного фосфора в почве на

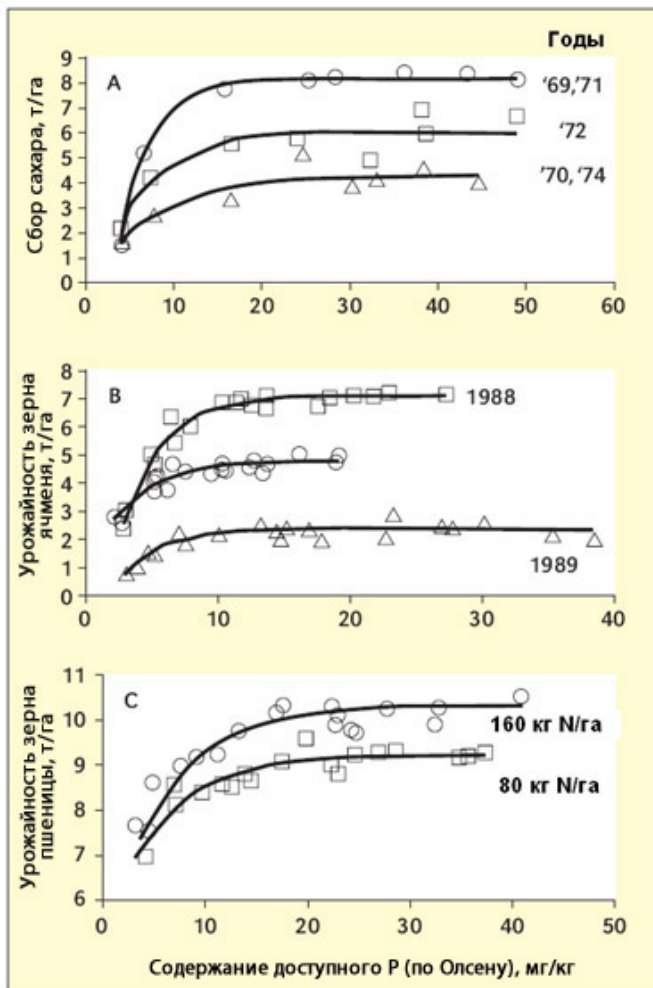


Рис. 4. Примеры кривых отзывчивости для определения критических значений содержания доступного фосфора в почве для некоторых сельскохозяйственных культур.

уровне, не ограничивающем урожайность. При этом отзывчивость на внесение удобрений не ожидается. Примеры кривых отзывчивости - зависимости урожайности от содержания доступного фосфора, полученных по данным Ротамстедского опыта, показаны на рис. 4. Для трех культур - сахарной свеклы (сбор сахара с гектара), ярового ячменя и озимой ржи, критические уровни различались незначительно, хотя максимальная урожайность различалась по годам в зависимости от погодных условий или доз азота. Для достижения более высокого асимптотического уровня урожайности не требовалось более высокого содержания доступного фосфора в верхнем слое 0-23 см, чем критический уровень.

Второй вопрос: Сколько фосфора должно быть внесено с удобрениями для повышения содержания доступного фосфора в почве до критического уровня?

Ответ на этот вопрос во многом зависит от конкретных почвенно-климатических условий. Поэтому необходимо проведение больших дополнительных исследований с учетом типа почвы, ее объемной плотности, способа внесения фосфорных удобрений и глубины отбора проб. Два следующих примера показывают, что можно сделать. Первый пример - опыт, заложен

Таблица 1. Суммарная доза фосфора, баланс фосфора за 1986–1991 гг. и содержание доступного фосфора (по методу Олсена), в 1986 и 1991 г.

Суммарная доза P, кг/га	Баланс P ¹ , кг/га	Доступный фосфор, мг/кг	
		1986 г.	1991 г.
786	700	7	48
522	437	8	38
264	182	7	18

¹Превышение внесенного фосфора над его выносом с урожаяем.

ный в 1856 г. на тяжелосуглинистой почве Ротамстедской опытной станции. Схема опыта, была изменена для определения количества фосфорных удобрений, необходимых для повышения содержания доступного фосфора (Пултон и Джонстон, частное сообщение). В период с 1865 г. до 1901 г. в пяти вариантах опыта содержание доступного фосфора изменялось в узком диапазоне. С 1986 г. по 1991 г этот диапазон был расширен за счет внесения удобрений в суммарных дозах от 264 до 786 кг P/га. Суммарные дозы внесенных фосфорных удобрений, баланс фосфора, а также содержание доступного фосфора в начале и конце опыта приведены в **табл. 1**. Благодаря положительному балансу фосфора (182 кг P/га) исходное содержание доступного фосфора повысилось с 7 до 18 мг P/кг почвы. Яровой ячмень выращивали ежегодно с 1986 г. до 1991 г. На кривой отзывчивости асимптотическая урожайность зерна, равная 98% от максимальной, составила 5.21 т/га, а соответствующее содержание доступного фосфора было равно 14 мг P/кг почвы. Таким образом положительного баланса фосфора (182 кг P/га) при внесении суммарной дозы фосфорных удобрений 264 кг P/га в верхний слой почвы (0–23 см) в течение 6 лет было достаточно для повышения содержания доступного фосфора выше критического уровня. Вторым примером - опыт, описанный Макколлумом (McCullum, 1991). В этом опыте в опесчаненной легкосуглинистой почве содержание фосфора по методу Мелиха-1 определялось в слое почвы 0–15 см в течение начального 9-летнего периода, когда вносились фосфорные удобрения. В начале опыта содержание доступного фосфора в почве было уже близко к критическому уровню для кукурузы (18–22 г/м³) и превышало данный уровень для сои. Однако внесение фосфорных удобрений в дозах от 0 до 1120 кг P/га за 9-летний период приводило к линейному росту содержания доступного фосфора (метод Мелиха-1), при этом каждое внесение 10 кг P/га повышало содержание доступного фосфора на 1 г/м³.

Третий вопрос: Сколько фосфора необходимо для поддержания содержания доступного фосфора на критическом уровне?

Ротамстедский опыт продолжался, но в период с 1993 г. по 1999 г. фосфорные удобрения не вносились. К 1999 г. содержание доступного фосфора в почве находилось в диапазоне от 2 до 31 мг P/кг, что позволило оценить отзывчивость на фосфорные удобрения в зависимости от содержания доступного фосфора в почве. С 2002 г. по 2006 г. под озимую пшеницу, ежегодно вносили 20 кг P/га для возмещения максимального выноса элемента зерном и соломой на тех делянках, где фосфорные удобрения ежегодно вносили с 1986 г. по 1991 г. Эта доза

Таблица 2. Содержание доступного фосфора (по Олсену), максимальная урожайность зерна озимой пшеницы, вынос фосфора зерном и соломой, ежегодная доза фосфорных удобрений и коэффициент выноса фосфора

Содержание доступного фосфора, мг/кг почвы, в 2004 г.	9	14	23	31
Урожайность зерна озимой пшеницы, т/га	7.1	7.8	7.9	7.9
Вынос фосфора зерном и соломой, кг/га	14	27	19	19
Ежегодная доза фосфорного удобрения, кг P/га	20	20	20	20
Коэффициент выноса фосфора, %	70	85	95	95

фосфорных удобрений позволила поддерживать содержание подвижного фосфора на уровне 1999 г.

Результаты этого опыта показывают, что максимальная урожайность зерна была получена при содержании доступного фосфора в почве на критическом уровне и его поддержании путем возмещения выноса элемента урожаем. В этом случае эффективность использования фосфора из удобрений, применяемых ежегодно, превышала 90% (**табл. 2**).

В **табл. 2** показано, что максимальная урожайность была на уровне 7.9 т/га, при этом соответствующее содержание доступного фосфора было 23 мг P/кг почвы. При повышении содержания доступного фосфора до 31 мг P/кг урожайность не возрастала. На почве, содержащей доступного фосфора менее, чем 14 мг P/кг, урожайность снизилась, что могло привести к финансовым потерям фермера. Поддержание содержания доступного фосфора в почве на критическом уровне путем возмещения элемента, вынесенного надземной биомассой, привело к более чем 95%-ной эффективности использования фосфора из ежегодно вносимых удобрений. Аналогичные результаты были получены, в опыте, описанном Макколлумом (McCullum, 1991), в котором возмещение фосфора, вынесенного с урожаем, поддерживало критический уровень содержания доступного фосфора, определяемого по методу Мелиха-1.

Выводы

В данном обзоре о состоянии фосфора в почве и эффективности использования фосфора из минеральных удобрений предполагается, что почвенный фосфор распределен между четырьмя пулами в зависимости от его доступности для поглощения корнями растений и степени экстрагируемости реагентами, используемыми в почвенных анализах. Предполагается также, что эти два показателя тесно коррелируют.

Эта концепция имеет практическое значение для эффективного использования фосфорных удобрений. В большинстве почв содержание фосфора в пуле, легкодоступном для растений, должно быть увеличено до критического уровня, при котором урожайность не лимитируется недостатком фосфора и таким образом способствует наиболее эффективному использованию других элементов питания, необходимых для достижения оптимальной урожайности, особенно азота. Для большинства почв, в которых содержание доступного фосфора поддерживается около критического уровня, возмещение фосфора, ежегодно выносимого с урожаем,

обычно приводит к высокой эффективности использования фосфора, превышающей 90% при оценке «балансовым методом». В настоящее время разрабатывается схема опыта и идет поиск спонсоров для дальнейшей разработки концепции о критическом уровне содержания доступного фосфора для разных систем земледелия, типов почв и климатических условий.

Дж. Джонстон – старший научный сотрудник фонда Лоуса, Ротамстедская опытная станция, Великобритания (Lawes Trust, Rothamsted Research, Harpenden, UK. AL5 2JQ). E-mail: johnny.johnston@rothamsted.ac.uk

Д-р Сайер – сотрудник президента Наресуанского университета, Пхитсанулок, Тайланд. E-mail: keiths@nu.ac.th

Литература

Johnston, A.E. and P.R. Poulton. 1977. Rothamsted Experimental Station Report for 1976, Part 2: 53-85.

Johnston, A.E. 2001. Principles of crop nutrition for sustainable food production. Proceedings 459. York, UK, International Fertilizer Society. 39 pp.

McCullum, R.E. 1991. Agron. J. 83, 77-85.

Syers, J.K., A.E. Johnston, and D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Rome, Italy.

Перевод статьи и адаптация – к.б.н. Иванова С.Е.

Переводчик выражает благодарность к.б.н. Носову В.В. за ценные советы.

Как способ внесения может повысить эффективность калийных удобрений

Т.С. Мюррелл

Агрономическая эффективность калийных удобрений – это прибавка урожая на единицу действующего вещества внесенного удобрения. Эффективность внесения однократной высокой дозы калийных удобрений может быть сравнима с эффективностью ежегодного внесения относительно невысоких доз, что позволяет фермерам гибко планировать внесение удобрений в оптимальное время и наиболее подходящим способом. При внесении невысоких доз ленточный способ обычно более эффективен, чем разбросной. При минимальной обработке почвы глубокое ленточное внесение калийных удобрений может быть более эффективным для адекватного питания растений в засушливых условиях.

Фермеры применяют два основных способа внесения удобрений: разбросное и ленточное. При разбросном внесении калийные удобрения равномерно распределяются на поверхности почвы. Удобрение может быть оставлено на поверхности почвы при беспашотной обработке почвы или запахано на глубину нескольких сантиметров. При ленточном внесении удобрение размещается узкими полосами (лентами). Ленты могут располагаться на поверхности почвы или на определенной глубине.

Эффективность каждого метода зависит главным образом от системы земледелия, используемых агротехнических приемов и возделываемых сортов, а также условий окружающей среды. В настоящей статье мы более подробно рассмотрим эффективность калийных удобрений при выращивании кукурузы в севообороте с соей в кукурузном поясе умеренной зоны США. Обработка посевов механизирована, расстояние между рядами растений – 76 см. Кукурузный гибрид обычно высевают в апреле или мае, а убирают урожай в октябре. Обычно наиболее интенсивное поглощение калия растениями из почвы происходит в июне. Средняя норма посева составляет от 74 до 86 тыс. семян/га. Калийное удобрение, как правило, вносят разбросным способом осенью, после уборки сои. Весной следующего года сеют кукурузу. Пахотные земли находятся в различных формах собственности. При этом фермеры часто обрабатывают и собственные участки, находящиеся в частной собственности, и арендуемые.

Эффективность калийных удобрений

Использование термина «эффективность» часто подразумевает «получение большего при минимальных вложениях». Эффективность можно рассчитать различными способами, однако мы определяем, какую прибавку урожая дает применение калийных удобрений – это называют агрономической эффективностью (АЭ). Ее рассчитывают как отношение прибавки урожая в результате применения калийного удобрения к количеству внесенного удобрения и выражают в кг зерна/кг K_2O .

Чаще всего эффективность рассчитывают для одного вегетационного сезона, однако это неприменимо в случае разового внесения высокой дозы в запас на несколько лет. Периодическое однократное внесение высоких доз может оказаться таким же эффективным приемом, как и ежегодное применение невысоких доз. Например, в исследованиях Малларино с сотр. (Mallarino et al., 1991), проведенных в штате Айова (США), в севообороте кукуруза-соя сравнивали эффективность однократного внесения высокой дозы калийных удобрений, внесенных разбросным способом, в результате которого к началу исследований в почву было внесено 675 кг K_2O /га, с ежегодным внесением 54–81 кг K_2O /га вразброс (табл. 1). Через 10 лет общее количество внесенного калийного удобрения составило 675 кг K_2O /га в обоих вариантах опыта. Полученные величины АЭ были почти одинаковы: 10.6 и 10.0 кг зерна/кг K_2O для ежегодного внесения и