

ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕВООБОРОТОВ, БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОДОРОДИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

В.В. Лапа, Н.Н. Ивахненко

Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

В условиях дерново-подзолистых супесчаных почв Республики Беларусь урожайность сельскохозяйственных культур в значительной степени определяется плодородием почв и применением удобрений.

Сегодня очевидно, что повышение продуктивности сельскохозяйственных культур возможно при обоснованном сочетании всех звеньев агротехнологий и в первую очередь оптимизации минерального питания, рационального использования почвенных ресурсов, поддержания нормального фитосанитарного состояния посевов, использования биологических источников питания растений.

Применение минеральных и органических удобрений, наряду с воздействием на общий уровень урожайности сельскохозяйственных культур, является наиболее существенным фактором, способствующим сохранению и повышению плодородия почв. При нынешнем уровне плодородия почв в республике за счет минеральных и органических удобрений формируется около 45% урожайности сельскохозяйственных культур.

Система удобрения в севообороте основывается на нескольких показателях эффективности: агрономическом, когда требуется получить максимальную продуктивность сельскохозяйственных культур и окупаемость применяемых удобрений при снижении энергетических затрат на их применение; экономическом, в основу которого положен принцип наибольшей рентабельности и чистого дохода от применения удобрений; экологическом, предусматривающем сохранение необходимых экологических нормативов и т.д. Однако любая система удобрения должна быть направлена на сохранение, а при необходимости и повышение плодородия почвы, что не всегда соответствует остальным показателям эффективности и в первую очередь агроэкономическим. Сохранение и воспроизводство плодородия пахотных почв является задачей исключительной важности. Особую значимость это приобретает в современных условиях ведения сельского хозяйства при дефиците удобрений и их высокой стоимости.

При этом оценить правильность систем удобрения можно только в условиях их длительного применения в севооборотах. Существенное значение для обоснования наиболее эффективных уровней применения удобрений и целенаправленного регулирования почвенного плодородия имеют балансовые расчеты. Уровень применения удобрений в севооборотах, обеспечивающий их максимальную продуктивность и благоприятный баланс элементов питания, может

быть важным нормативным материалом при разработке мероприятий по сохранению или повышению плодородия почвы [1–5].

Цель исследований – разработать агрохимическую модель формирования высокой урожайности сельскохозяйственных культур, обеспечивающую рациональное использование почвенных запасов элементов питания, окупаемость 1 кг NPK 8–10 к.ед., получение растениеводческой продукции, сбалансированной по основным макро- и микроэлементам в соответствии с нормативными требованиями.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 1987–2009 гг. в ГП «Экспериментальная база им. А.В. Суворова» в Узденском районе Минской области в длительном стационарном полевом опыте на дерново-подзолистой супесчаной, подстилаемой с глубины 0,3–0,5 м песком почве, хорошо обеспеченной фосфором и калием, изучалась эффективность доз и сроков внесения азотных удобрений на фоне фосфорных и калийных. Опыт развернут в пространстве в двух полях со следующим чередованием культур в севооборотах: 1987–1991 гг. – 1 (первая ротация – зернопропашной) – кормовая свекла Эккендорфская желтая, ячмень Ида, озимая рожь Пуховчанка, овес Буг; 1991–1995 гг. – 2 (вторая ротация – зернопропашной) – картофель Орбита, ячмень Визит, озимая рожь Верасень, яровая пшеница Иволга; 1995–1999 гг. – 3 (третья ротация – зернопропашной) – картофель Орбита, ячмень Сябра, озимая рожь Верасень, овес Дукач; 1999–2004 гг. – 4 (четвертая ротация – зерноотравно-пропашной) – картофель Скарб, ячмень Дзівосны, озимая рожь Ігуменская с подсевом клевера лугового, клевер луговой Слуцкий ранний, озимая тритикале Міхась; 2005–2009 гг. – 5 (пятая ротация – зерноотравно-пропашной) – горохо-овсяная смесь, ячмень Гонар, озимая рожь Зарніца (диплоидный сорт) с подсевом клевера лугового, клевер луговой Устойлівы, озимая тритикале Вольгарио.

Перед закладкой опыта почва пахотного слоя имела следующую агрохимическую характеристику: $pH_{\text{сол.}}$ – 5,6–5,9, гидролитическая кислотность – 2,11–2,29 смоль (+)/кг почвы, сумма обменных оснований – 6,12–6,37 смоль (+)/кг почвы, содержание подвижных форм фосфора – 120–150 и калия – 200–250 мг/кг, нитратного азота – 5,0–7,0 мг/кг, гумуса – 2,4–2,5%.

Осенью 1986, 1987 гг. почву известковали доломитовой мукой в дозах, рассчитанных на доведение $pH_{\text{сол.}}$ по делянкам до 6,0, а также вносили фоном (75 т/га) торфоновозный компост (влажность – 73,3%, $pH_{\text{сол.}}$ – 7,3, зольность – 11,6%, $N_{\text{общ.}}$ – 0,49, $N-NH_4$ – 0,06, P_2O_5 – 0,18, K_2O – 0,46%).

Осенью 1991, 1992 гг. под картофель внесен торфоновозный компост – 80 т/га с содержанием N – 0,42%, P_2O_5 – 0,15 и K_2O – 0,57%.

Осенью 1994, 1995 гг. под картофель внесен солоmistый навоз КРС из расчета 70 т/га, с содержанием N – 0,36%, P_2O_5 – 0,18 и K_2O – 0,33%;

Осенью 1998, 1999 гг. под картофель внесено 60 т/га солоmistого навоза КРС (влажность – 74,1%, $pH_{\text{сол.}}$ – 7,6, зольность – 38,4%, содержание азота – 0,41%, фосфора – 0,24 и калия – 0,43%).

Осенью 2003, 2004 гг. под горохо-овсяную смесь внесено 40 т/га солоmistого навоза КРС с содержанием N – 0,48%, P_2O_5 – 0,39 и K_2O – 0,73%.

Химический анализ органических удобрений выполнен в соответствии с государственными отраслевыми стандартами: определение влаги и сухого остатка – ГОСТ 26713–85, золы – ГОСТ 26714–85, общего азота – ГОСТ 26715–85, общего фосфора – ГОСТ 26717–85, общего калия – ГОСТ 26718–85.

Минеральные удобрения (карбамид, аммонизированный суперфосфат и хлористый калий) вносили под предпосадочную и предпосевную культивацию согласно схеме опыта на фоне действия и последствий органических удобрений (табл. 1).

Общая площадь делянки – 45 м² (9 м х 5 м), учетная для зерновых – 32 м² (8 м х 4,0 м), для пропашных – 22,4 м² (8 м х 2,8 м), повторность вариантов – 4-кратная.

Предпосадочную и предпосевную обработку почвы и уход за растениями осуществляли в соответствии с отраслевыми регламентами [6]. В опыте применяли интегрированную систему защиты растений от сорняков, болезней и вредителей.

Анализ почвенных и растительных образцов проводили в соответствии с общепринятыми методиками: гидролитическую кислотность – по Каппену, сумму обменных оснований – по Каппену-Гильковицу, фосфор и калий в почве – по методу Кирсанова, обменные кальций и магний – методом ЦИНАО на атомно-абсорбционном спектрофотометре (ГОСТ 26570–95, ГОСТ 305–97), гумус – по Тюрину в модификации ЦИНИО; в растительных образцах после мокрого озоления проб в смеси серной кислоты и пергидроля определяли: азот и фосфор – фотоколориметрическим индофенольным и ванадо-молибдатным методами (ГОСТ 26657–85), калий – на пламенном фотометре (ГОСТ 30504–97).

Годы исследований (1987–2009 гг.) различались по метеорологическим условиям. Наиболее благоприятными для роста и развития растений были 1987, 1991, 1993 и 1995 гг., которые характеризовались достаточным количеством осадков и их равномерным распределением, температурой воздуха близкой к средней многолетней. Другие годы (1988–1990, 1992, 1994, 1996 и 1999, 2000, 2002) отличались значительным недостатком влаги в апреле-июне (30–40% от среднемноголетней) и более высокой температурой воздуха в первой половине вегетации растений. Существенные отклонения от нормы наблюдались в 1992 г.: величина гидротермического коэффициента составила всего 0,5 при среднемноголетней 1,6. Условия 1993 г. (май-август), если судить по ГТК–1,7, близки к среднемноголетним. Однако следует отметить некоторый недостаток влаги в мае (выпало 48% нормы осадков при температуре на 3 °С выше среднемноголетней) и ливневые дожди в июле, которые способствовали в сочетании с последующей дождливой и холодной погодой сильному полеганию зерновых при этом существенно отодвинулся срок их созревания. Отсутствие осадков в июле 1994 г., высокая дневная температура в период налива зерна (более 30 °С) также не способствовали благоприятному ходу формирования урожая зерновых культур. Вегетационные периоды 1997 и 1998 гг. по количеству осадков и температуре воздуха были похожи и характеризовались как влажные. Температурные условия в 1995–1998 гг. были менее выражены относительно среднемноголетней величины. 1996 г. отличался недостатком осадков в вегетационный период, т.к. их количество за пять месяцев (апрель, май, июнь, июль, август) составило 273,7 мм, в 1995 г. – 363,9, в 1997 г. – 322,8 мм, в 1998 г. – 494 мм, что на 220 мм больше,

чем в 1996 г., в 1999 г. – 290 мм, в 2000 г. – 240,2 мм, в 2001 г. – 335 мм, в 2002 г. – 238 мм, в 2003 г. – 348 мм, в 2004 г. – 387,4 мм и в 2005 г. – 399,9 мм, в 2006 г. – 455 мм, в 2007 г. – 281,8 мм, в 2008 – 310,1 мм, в 2009 г. – 502,8 мм при средней многолетней величине 302 мм. Сумма активных температур также изменялась по годам исследований, а в соответствии с этими показателями изменялся и условный показатель увлажнения – гидротермический коэффициент (ГТК по Селянинову), который в 1999 г. составил 1,02, в 2000 г. – 1,22, в 2001 г. – 1,43, в 2002 г. – 1,01, в 2003 г. – 1,39, в 2004 г. – 1,77 (1,12–2,8), в 2005 г. – 1,73 (0,73–3,31), в 2006 г. – 1,3–4,8, в 2007 г. – 0,3–2,5, в 2008 г. – 0,8–1,7, в 2009 г. – 0,3–5,5.

Вегетационный период 2004 г. и 2005 г. отличался затяжной и холодной весной и количеством осадков выше средней многолетней величины в июле и августе, что продлило созревание зерновых культур на две недели. Очень сложные погодные условия сложились в вегетационный период в 2006 г. Апрель характеризовался прохладной и сухой погодой. После посева горохо-овсяной смеси и зерновых за 15 дней при прохладной и ветреной погоде не выпало ни одного мм осадков. В период налива зерна в течение 20 дней во второй половине июня и первой половине июля также осадков не было. В августе выпадение осадков было в три раза выше среднего многолетнего уровня. В сумме за 5 месяцев количество осадков превысило среднюю многолетнюю величину на 105 мм.

Температура воздуха всего периода вегетации 2007 г. превышала средне-многолетний уровень на 1,2–4,0 °С. Количество осадков в апреле и июне в 3 и 2 раза соответственно было меньше средней многолетней величины, а сумма осадков за 5 месяцев – на 70 мм ниже. Недостаток влаги и повышенная температура воздуха оказали отрицательное влияние на урожайность клевера лугового и зерновых во всех вариантах опыта при возделывании на дерново-подзолистой супесчаной почве.

За апрель-август 2008 г. выпало 310,1 мм осадков, что только на 40 мм меньше среднемноголетней величины (350 мм). Гидротермический коэффициент изменялся в пределах от 0,8 (июнь) до 1,7 (апрель), что позволяет сделать заключение о некотором недостатке влаги, т.к. месяцы с ГТК от 1,0 до 1,3 (май и август) относятся к слабозасушливым, от 1,0 до 0,7 (июнь) – к засушливым, а от 1,3 до 1,6 (июль) – к оптимальным.

За апрель-август 2009 г. выпало 502,8 мм осадков. Однако в апреле только 4,6 мм (среднемноголетнее 46 мм), а в июне 255 мм при среднемноголетнем 78 мм (12 июня – 48,1 мм, а 23 июня – 91,5 мм). Гидротермический коэффициент в течение вегетационного периода изменялся в пределах от 0,3 (апрель) до 5,6 (июнь), что свидетельствует о высоком избытке влаги не только в июне, но и в мае и в июле, т.к. месяцы с ГТК выше 1,6 характеризуются как избыточно влажные.

В Беларуси вегетационные периоды с показателями ГТК 1,0–1,3 характеризуются как слабозасушливые, 1,3–1,6 – как оптимальные, а больше 1,6 – как влажные [7].

Таблица 1

Схема опыта и распределение удобрений по ротациям севооборота на дерново-подзолистой супесчаной почве (1987 – 008/2009 гг.)

Ва-риант	Сумма НРК по ротациям севооборотов, кг/га					Сумма НРК за пять ротаций	В среднем за год, кг/га
	1987/1988 гг. – 1990/1991 гг. 1	1991/1992 гг. – 1994/1995 гг. 2	1995/1997 гг. – 1999/2001 гг. 3	2000/2002 гг. – 2003/2005 гг. 4	2004/006 гг. – 2008/2010 гг. 5		
1	Контроль без удобрений						
2	75 т/га ТНК – фон	80 т/га НКРС – фон	70 т/га НКРС – фон	60 т/га НКРС – фон	40 т/га НКРС – фон	325 т/га орг. уд. – фон	14,8 т/га орг. уд. – фон
3	N420P300	N390P300	N300P280	N300P350	N300P350	N1710P1580	фон+N77,7P71,8
4	N420K450	N390K420	N300K510	N300K630	N300K600	N1710K2610	фон+ N77,7K118,6
5	P300K450	P300K420	P280K510	P350K630	P350K600	P1580K2610	фон + P71,8K118,6
6	N280P300K450	N260P300K420	N180P280K510	N180P350K630	N180P350K600	N1080P1580K2610	фон+N49P71,8K118,6
7	N420P300K450	N390P300K420	N300P280K510	N300P350K630	N300P350K600	N1710P1580K2610	фон+N77,7P71,8K118,6
8	N420P450K675	N390P450K630	N420P280K510	N420P350K630	N420P350K600	N2070P1580K3045	фон+N94P85,5K138,4
9	N300+120P300K450	N260+130P300K420	P160K360	P200K440	P200K400	N810P980K2070	фон+N36,8P44,5K94,1
10	N300+120P300K675	N260+130P300K420	N180P160 K360	N180P200 K440	N180P200K400	N1350P980K2295	фон+N61,4P44,5K104
11	N300+120P450K675	N260+130P450K630	N300P160K360	N300P200K440	N300P200K400	N1710P1130K2505	фон+N77,7P51,4K113,9
12	N390+170P300K450	N360+160P300K420	N420P160K360	N420P200K440	N420P200K400	N2340P1160K2070	фон+N106,4 P52,7K94
13	N390+170P450K675	N360+160P450K630	P80K180	P100K220	P100K200	N1080P1180K1905	фон+N49 P53,6K86,6
14	N300+260P300K450	N260+260P300K420	N180P80K180	N180P100K220	N180P100K200	N1620P880K1470	фон+N73,4P40K66,8
15	N300+260P450K675	N260+260P450K630	N300P80K180	N300P100K220	N300P100K200	N1980P1180K1905	фон+N90P53,6K86,6

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продуктивность отдельных севооборотов в трех полях, урожайность сельскохозяйственных культур и их качество рассмотрены в работах [8–12].

В зернопропашном севообороте (1987–1991 гг.) максимальная урожайность корнеплодов кормовой свеклы 898 ц/га получена при применении N150P135K225. Однако более достоверная урожайность корнеплодов 867 ц/га формировалась при внесении N150P90K150 на фоне 75 т/га торфонавозного компоста. Применение азотных удобрений N150–200 кг/га д.в. в два-три срока было неэффективным и даже приводило к снижению урожая корнеплодов. Оптимальная доза под ячмень составила N90P70K100. При применении указанной дозы получена урожайность зерна ячменя 39,4 ц/га зерна. Повышение доз азотных удобрений до 120 кг/га д.в., а также внесение их в два-три срока не способствовало увеличению урожайности зерна. Отсутствие эффекта от азотных подкормок объясняется недостатком влаги в период их проведения (фазы кущения и начала выхода в трубку). Дозы P70K100 также можно считать оптимальными для исследуемой почвы, так как последовательное увеличение количества P_2O_5 до 105 и K_2O до 150 кг/га не приводило к росту урожайности ячменя (табл. 2). Наиболее высокая урожайность озимой ржи Пуховчанка отмечена в двух вариантах: с внесением N60 весной в подкормку в начале вегетации растений и N60 в начале выхода в трубку на фонах P70K100 и P105K150 – соответственно 54,3 и 55,8 ц/га при НСР₀₅ 1,4 ц/га. Однако в варианте N60 + 60P70K100 окупаемость 1 кг NPK прибавкой урожая на 1,5 кг больше, чем при внесении N60 + 60P105K150, что дает основание считать первый вариант более приемлемым. Оптимальные условия минерального питания овса Буг формировались при внесении N60P70K100 + N30 в подкормку в стадию начала трубкования, урожай составил 46,8 ц/га. Применение такой же дозы азота (N90) в один прием под предпосевную культивацию было менее эффективным, урожай по сравнению с оптимальным вариантом снижался на 4,2 ц/га (табл. 2).

Максимальная продуктивность зернопропашного севооборота (1987–1991 гг.) 89,0 ц к.ед./га получена при среднегодовом внесении N105P112,5K168,8 на фоне среднегодового применения 18,8 т/га торфонавозного компоста. Прибавка от минеральных удобрений составила 34,5 ц к.ед./га при окупаемости 1 кг NPK 8,9 кг кормовых единиц. Однако оптимальная продуктивность 85,7 ц к.ед./га (достоверная, НСР – 4,6 к.ед.) формировалась при применении N105P75K112 на фоне 18,8 т/га органических удобрений, при этом прибавка кормовых единиц составила 31,2 ц/га при окупаемости 1 кг NPK 10,7 к.ед.

В целом по севообороту не получено достоверной прибавки продуктивности от внесения азотных удобрений в два-три срока, так как по двум культурам, кормовой свекле и ячменю, наиболее высокий урожай обеспечивался при внесении всей дозы азота в один прием под предпосевную культивацию. Увеличение среднегодового уровня применения минеральных удобрений до N140P112K169 не приводило к росту продуктивности севооборота.

Отсутствие в системе удобрения азотных удобрений привело к недобору продуктивности севооборота на 22,0–25,3 ц к.ед./га (табл. 2).

**Влияние доз и сроков внесения минеральных удобрений
на продуктивность зернопропашного севооборота и
баланс элементов питания (1987–1991 гг.)**

Вариант	Продуктивность севооборота, ц к.ед./га		Прибавка к фону	Окупаемость 1 кг НРК, кг к.ед.	Баланс, кг/га		
	общая	среднегодовая			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Без удобрений	195,5	48,9	–	–	–50,8	–26,6	–110,1
2. Торфонавозный компост 18,8 т/га – фон	218,0	54,5	–	–	+ 8,5	+ 4,2	–44,8
3. N105P75	289,4	72,4	17,9	9,9	+ 42,9	+ 67,6	– 97,6
4. N105K112,5	300,8	75,4	20,7	9,5	+ 37,5	–4,3	–4,7
5. P75K112,5	254,9	63,7	9,2	4,9	–5,9	+ 72,3	+ 23,1
6. N70P75K112,5	318,8	79,7	25,2	9,8	+ 12,1	+ 64,2	–0,4
7. N105P75K112,5	342,8	85,7	31,2	10,7	+ 26,0	+ 63,5	–22,7
8. N105P112,5K168,8	355,9	89,0	34,5	8,9	+ 24,1	+ 98,9	+ 7,6
9. N105*P75K112,5	350,9	87,7	33,2	11,4	+ 18,5	+ 62,0	–50,6
10. N105*P75K168,8	345,6	86,4	31,9	9,1	+ 26,5	+ 62,4	+ 20,7
11. N105*P112,5 K168,8	338,8	84,7	30,2	7,8	+ 26,8	+102,5	+ 34,4
12. N140*P75K112,5	351,6	87,9	33,4	10,2	+ 34,2	+ 63,1	–50,4
13. N140* P112,5K168,8	353,9	88,5	34,0	8,1	+ 27,7	+ 97,2	–11,2
14. N140*P75K112,5	328,2	82,0	27,5	8,4	+ 45,6	+ 64,8	–23,5
15. N140*P112,5K168,8	317,0	79,2	24,7	5,9	+ 47,8	+104,0	+ 36,4
HCP ₀₅		4,6					

Примечание. Внесение азотных удобрений в два-три срока.

По данным баланса элементов питания [13], в среднем за ротацию севооборота (1987–1991 гг.) наиболее эффективное использование азотных и фосфорных удобрений отмечается при среднегодовых дозах, соответственно равных 105 и 75 кг/га (табл. 2): баланс азота в варианте 9 составил 18,5, фосфора – 62,0 кг/га. Баланс калия в этом варианте при среднегодовой дозе 112,5 кг д.в./га был отрицательный, что связано, по нашему мнению, с высоким урожаем (≈ 800 ц/га) и выносом калия кормовой свеклой.

Положительный баланс калия на уровне 20 кг/га обеспечила среднегодовая доза калия 168,8 кг д.в./га, однако роста продуктивности севооборота при этом не наблюдалось. Поэтому для дерново-подзолистых супесчаных почв более целесообразным является среднегодовой уровень применения минеральных удобрений N105P75K112. Оптимальный режим минерального питания в севообороте обеспечивался при интенсивности баланса азота, равной 114%, фосфора – 232%. Интенсивность баланса калия в севооборотах с кормовой свеклой необходимо поддерживать на уровне 108–115%.

Применение 450 кг д.в. фосфорных удобрений за ротацию севооборота (112 кг/га в год) обеспечило повышение запасов подвижных фосфатов (по Кирсанову) в почве на 103–121 мг/кг в зависимости от соотношений с азотными и калийными удобрениями (табл. 9). При ежегодном балансе фосфора в севообороте 97,2–104,0 кг/га затраты P_2O_5 (сверх выноса с урожаем) на повышение его содержания в почве на каждые 10 мг/кг составили 33–40 кг/га (табл. 9).

Повышение содержания калия в почве отмечено только в вариантах с его положительным балансом, который обеспечивался при среднегодовых дозах калия 169 кг д.в./га. Среднегодовое внесение K_2O 112 кг/га в севообороте с кормовой свеклой на супесчаной почве было недостаточным для поддержания запасов калия на достигнутом уровне. В этом отношении фактическое изменение содержания калия в почвах достаточно хорошо согласуется с результатами балансовых расчетов по калию за ротацию севооборота (табл. 9).

Во второй ротации зернопропашного севооборота (1991–1995 гг.) максимальная урожайность клубней картофеля 242 ц/га формировалась при внесении N120P135K180 на фоне 80 т/га навоза крупного рогатого скота. Однако, исходя из ограниченных поставок фосфора и высокой стоимости удобрений в республике, на данном этапе оптимальной можно рекомендовать дозу N60P90K120 на фоне 80 т/га органических удобрений, при которой получена урожайность клубней 224 ц/га.

Наиболее эффективная доза минеральных удобрений для ячменя, обеспечивающая урожайность на уровне 50–53 ц/га, 230–260 кг д.в./га **НРК на фоне** последствия органических удобрений. Оптимальная доза азотных удобрений – 60 кг/га, вносимая в один прием, и N90, вносимая в два срока в вегетационные периоды с благоприятным водным режимом на фоне P70K100.

Оптимальная доза минеральных удобрений под озимую рожь 260 кг/га д.в. **НРК (N60P70K100)** обеспечила урожайность зерна на уровне 55 ц/га. Азотные удобрения необходимо вносить в два срока – N60 весной при возобновлении вегетации растений + N30 в фазу трубкования.

Урожайность зерна яровой пшеницы на уровне 22,4–25,7 ц/га формировалась при внесении N60P70K100 и N90P70K150 (N90 вносили в два приема – N60 под предпосевную культивацию и N30 в фазу кущения).

Максимальная продуктивность зернопропашного севооборота (1991–1995 гг.) на уровне 60–65 ц к.ед./га на дерново-подзолистой супесчаной почве обеспечивалась при среднегодовом внесении N65 в один срок и N97,5 в два срока на фоне P75K105 и 20 т/га органических удобрений.

Внесение 97,5–130 кг/га д.в. азотных удобрений в два срока повысило среднегодовую продуктивность севооборота на 3,8–5,2 ц к.ед./га и способствовало более эффективному использованию минеральных удобрений.

Калийные удобрения увеличили среднегодовую продуктивность на 3,2 ц к.ед./га, фосфорные только – на 0,5 ц к.ед./га.

Увеличение среднегодового уровня применения минеральных удобрений не приводило к росту продуктивности севооборота (табл. 3).

**Влияние доз и сроков внесения минеральных удобрений
на продуктивность второй ротации зернопропашного севооборота и
баланс элементов питания (1991–1995 гг.)**

Вариант	Продуктив- ность севообо- рота, ц к.ед./га		При- бавка к фону	Окупа- емость 1 кг НРК, кг к.ед.	Баланс, кг/га		
	общая	средне- годовая			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Без удобрений	151,0	37,7	–	–	– 50	– 20	– 71
2. Торфонавозный компост 20 т/га – фон	170,4	42,5	4,8		– 15	+ 7	– 26
3. N97,5P75	232,0	58,0	15,5	9,0	+ 16	+ 73	– 9
4. N97,5K105	242,6	60,7	18,2	9,0	+ 11	– 3	+ 82
5. P75K105	192,0	48,0	5,5	3,0	– 22	+ 79	+ 112
6. N65P75K105	240,8	60,2	17,7	7,2	– 4	+ 70	+ 80
7. N97,5P75K105	244,6	61,2	18,7	6,7	+ 7	+ 71	+ 77
8. N97,5P112K158	249,6	62,5	20,0	5,4	+ 3	+ 107	+ 109
9. N97,5*P75K105	261,8	65,4	22,9	8,2	+ 2	+ 69	+ 63
10. N97,5*P75K158	253,9	63,6	21,1	6,4	+ 3	+ 70	+ 119
11. N97,5*P112K158	251,6	62,9	20,4	5,6	+ 3	+ 106	+ 117
12. N130*P75K105	260,0	65,0	22,5	7,2	+ 15	+ 69	+ 59
13. N130* P112K158	265,4	66,3	23,8	6,0	+ 13	+ 106	+ 101
14. N130*P75K105	249,7	62,4	19,9	6,4	+ 15	+ 70	+ 62
15. N130*P112K158K112,543	248,4	62,1	19,6	4,9	+ 18	+ 106	+ 110
НСП ₀₅		3,0					

Примечание. Внесение азотных удобрений в два-три срока.

Расчет баланса элементов питания [13], выполненный в среднем по севообороту, показал, что применение 20 т/га севооборотной площади органических и минеральных удобрений в дозах N97,5–130 P75–112 K105–158 обеспечило положительные балансы всех элементов питания. Баланс азота изменялся в пределах 7–18 кг/га, фосфора – 69–107кг/га, калия – 59–119 кг/га в вариантах с полным минеральным удобрением. Применение такого уровня удобрений было ориентировано на расширенную систему воспроизводства почвенного плодородия и обеспечило накопление фосфора в почве за ротацию севооборота до 16 мг/га, калия – до 35 мг/кг почвы (табл. 9). Коэффициент использования азота из удобрений при этом составил 49–58%, фосфора – 11–17%, калия – 41–68%. При увеличении доз минеральных удобрений коэффициенты использования элементов питания из удобрений снижались.

В третьей ротации зернопропашного севооборота (1995–1999 гг.) оптимальная урожайность клубней картофеля на уровне 250–280 ц/га формировалась при применении органо-минеральной системы удобрения – 70 т/га навоза КРС + N60P40K120; зерна ячменя (урожайность 41–45 ц/га) – N30P20K40 и N60P40K80 + N30 в фазу начала стеблевания на фоне последействия 70 т/га органических удобрений; зерна озимой ржи (урожайность – 40–45 ц/га) – P40K80 + N90 весной при возобновлении вегетации растений + N30 в фазу начала стеблевания; зерна овса – (урожайность 35–45 ц/га) – N60P40K80 + N30 в фазу начала стеблевания.

Наиболее высокая среднегодовая продуктивность зернопропашного севооборота (1995–1999 гг.) 62,6 ц/га к.ед. формировалась при внесении максимальной дозы азотных удобрений – 105 кг д. в. /га в два срока на фоне P70K127,7 (100% компенсации выноса P₂O₅ и K₂O с урожаем). Окупаемость 1 кг NPK в данном варианте была 6,9 к.ед., а азотных удобрений – 16 к.ед. Оптимальная продуктивность 61,7 ц к.ед./га получена при внесении 105 кг д.в. азотных удобрений в два срока на фоне P40K90. Дополнительно за счет NPK получено 20,0 ц к.ед/га при окупаемости 1 кг NPK 8,5 кг зерна. Варианты удобрения сельскохозяйственных культур со среднегодовым внесением N45–75P20K45 (50% компенсации выносов P₂O₅ и K₂O) обеспечили среднегодовую продуктивность севооборота 55,8–56,7 ц/га к.ед., или на 0,9 и 3,1 ц/га к.ед. меньше, чем при 100 компенсации выносов фосфора и калия, однако, окупаемость 1 кг NPK здесь была самая высокая и составила 10,7–12,8 к.ед. (табл. 4).

Таблица 4

Продуктивность третьей ротации зернопропашного севооборота и баланс элементов питания (1995–1999 гг.)

Вариант	Продуктивность, ц/га к.ед.	Прибавка от удобрений, ц/га к.ед.		Оплата к.ед. 1 кг		Баланс, кг/га		
		NPK	N	NPK	N	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Без удобрений	33,8	–	–	–	–	– 25,3	– 17,5	– 71,6
2. 17,5 т/га НКРС – фон	41,7	7,9	–	1,0	–	12,5	9	44,9
3. N75P70	56,8	15,1	–	10,4	–	39,0	70,7	15,3
4. N75K127,5	54,8	13,1	–	6,5	–	40,0	2	139,4
5. P70K127,5	49,2	7,5	–	3,8	–	3,3	74,7	157,2
6. N45P70K127,5	56,7	15,1	7,6	6,2	21,0	20,6	70,9	139,5
7. N75P70K127,5	59,8	18,1	10,6	6,7	17,7	34,3	68,7	130,9
8. N105P70K127,5	62,6	20,9	13,4	6,9	16,0	49,1	68,1	124,6
9. P40K90	49,5	7,9	–	6,1	–	4,1	46,1	118,9

Вариант	Продуктивность, ц/га к.ед.	Прибавка от удобрений, ц/га к.ед.		Оплата к.ед. 1 кг		Баланс, кг/га		
		НPK	N	НPK	N	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
10.N45P40K90	58,9	17,2	9,3	9,9	26,0	21,1	41,6	103
11.N75P40K90	57,5	15,8	7,9	7,7	13,2	37,1	41,6	98,6
12.N105P40K90	61,7	20,0	12,1	8,5	14,5	52,1	39,2	87,7
13.P20K45	48,6	6,9	–	10,7	–	6,1	26,7	72,6
14.N45P20K45	55,8	14,1	7,2	12,8	20,0	26,1	22,5	55,3
15.N75P20K45	56,7	15,0	8,1	10,7	13,5	40,8	21,5	50,4
НCP ₀₅	2,6							

Примечание. Внесение азотных удобрений в два срока.

Применение фосфорных и калийных удобрений в расчете на положительные балансы P₂O₅ и K₂O (N45–105P70K127,5) не обеспечило достоверного увеличения урожайности культур севооборота при одновременном снижении окупаемости 1 кг NPK до 6,2–6,9 к.ед. (табл. 4).

На дерново-подзолистой супесчаной почве при среднегодовой продуктивности севооборота на уровне 60–62 ц/га к.ед. наиболее эффективной является система удобрения со 100% компенсацией выносов фосфора и калия – N105P40K90 на фоне 17,5 т/га среднегодового применения органических удобрений. Данная система удобрения обеспечила положительный баланс элементов питания в почве при увеличении содержания фосфора на 7 мг/кг и калия – на 9 мг/кг в год (табл. 9).

При расчете баланса элементов питания в зернопропашном севообороте в приходную статью включено поступление азота, фосфора и калия с органическими (N71,8P42,6K75,2) и минеральными удобрениями, осадками и семенами (N13,9P1,5K10,7) [14]. Учтена фиксация азота свободноживущими микроорганизмами (из расчета 10 кг/га в год). В статью расхода включены: вынос элементов питания сельскохозяйственными культурами, газообразные потери азота, которые в среднем составляют 25% от общего количества, внесенного с минеральными и органическими удобрениями, вынос с инфильтрационными водами (N10K25).

Результаты исследований показали, что среднегодовая продуктивность севооборота формировалась при положительном балансе азота, фосфора и калия. Положительный баланс фосфора и калия прослеживается и при дозах удобрений, соответствующих 50% компенсации выносов P₂O₅ и K₂O с урожаем, что объясняется более низкой продуктивностью сельскохозяйственных культур и достаточно высокой дозой органических удобрений (17,5 т/га). Даже при отсутствии одного из удобрений в парных комбинациях PK, NP и NK баланс элементов питания оказался положительным (табл. 4).

Отрицательный баланс по азоту (–25,3), фосфору (–17,5) и калию (–71,6) отмечен только в варианте без минеральных и органических удобрений. С увеличением доз фосфорных и калийных удобрений баланс азота уменьшается с 6,1 до 3,3 и возрастает при повышении доз азотных удобрений (табл. 4).

Результаты исследований подвижных (по Кирсанову) форм фосфора и калия в почве показали, что их содержание увеличилось во всех вариантах, даже при внесении только органических удобрений. Содержание подвижного фосфора увеличилось в пахотном слое на 6–41 мг/кг, калия – на 34–45 мг/кг почвы. Кислотность пахотного слоя (pH_{KCl}) изменялась в пределах ошибки опыта, содержание гумуса сохранялось на первоначальном уровне или изменялось в сторону повышения на 0,09–0,62% (табл. 9, 10).

За три ротации 4-польного зернопропашного севооборота (1987–1999 гг.) при среднегодовом применении N68–125P48–98K88–151 продуктивность формировалась на уровне 65,5–71,5 ц к.ед./га. Максимальная среднегодовая за 12 лет продуктивность трех ротаций 71,5 ц к.ед./га получена при применении N125 P63K102,5 на фоне органических удобрений в среднегодовой дозе 18,8 т/га. При этом прибавка кормовых единиц составила 25,3 ц/га при окупаемости 1 кг NPK 8,7 к.ед. Содержание подвижных фосфора и калия в пахотном слое при указанной системе удобрения в основном изменялось в пределах ошибки опыта с тенденцией или достоверным накоплением на 28 и 34 мг/кг почвы соответственно. Кислотность пахотного слоя (pH_{KCl}) варьировала в пределах ошибки опыта или достоверно снижалась на 0,07–0,47 ед. Содержание гумуса при среднегодовом применении органических удобрений в дозе 18,8 т/га изменялось в сторону повышения на 0,20–0,92% (табл. 9, 10).

В зернотравяно-пропашном севообороте (1999–2004 гг.) на дерново-подзолистой супесчаной почве оптимальная урожайность клубней картофеля на уровне 335–376 ц/га формировалась при применении органо-минеральной системы удобрения – 60 т/га навоза KPC + N90 или N120 на фоне P40K120 (поддерживающие балансы фосфора и калия). Эти варианты обеспечивали достаточно высокие параметры окупаемости удобрений – 37–48 кг клубней на 1 кг NPK и 68–85 кг на 1 кг азота. При увеличении доз удобрений (N120P70K150) получена урожайность клубней 360 ц/га (НСР – 20ц/га) при окупаемости 1 кг NPK 34,7 кг клубней и 1 кг азота – 58 кг клубней.

Наиболее эффективными дозами минеральных удобрений под ячмень на фоне последействия 60 т/га органических удобрений оказались N60+30P40K80. Их внесение обеспечило урожайность зерна ячменя в среднем за два года 51,7 ц/га при окупаемости 1 кг NPK 7,3 кг зерна. Последействие органических удобрений обеспечило получение дополнительной прибавки урожайности зерна ячменя 7,9 ц/га.

Рекомендуемыми вариантами внесения минеральных удобрений под озимую рожь, обеспечивающими получение 46,0–48,3 ц/га зерна, являются N60P20K40 и N60+30P40K80. Окупаемость 1 кг NPK в оптимальных по урожайности зерна вариантах составила 17,6 и 11,7 кг зерна. Оптимальный срок внесения азотных удобрений: N60 весной в начале вегетации растений и N60 весной в начале вегетации растений + N30 в фазу первого узла стеблевания.

В качестве оптимальных доз под клевер луговой Слуцкий ранний рекомендуется применение P40K80. В сумме за три укоса и в среднем за два года

урожайность зеленой массы в этом варианте составила 581 ц/га при содержании сырого белка 17,2%.

При возделывании озимой тритикале на дерново-подзолистой супесчаной почве внесение возрастающих доз азотных удобрений обеспечило прибавку урожайности зерна 5,8–16,3 ц/га; фосфорных и калийных удобрений – соответственно 6,6–10,1 ц/га. Дробное внесение азота в дозе 120 кг/га (N90 в начале возобновления вегетации + N30 в фазу первого узла стеблевания) на фоне P70K120 способствовало формированию наибольшей в опыте урожайности зерна озимой тритикале 51,5 ц/га.

Для получения продуктивности зернотравяно-пропашного севооборота на уровне 88 ц к.ед./га наиболее эффективной оказалась система удобрения со 100% компенсацией выносов фосфора и калия – N84P40K88 на фоне 12,0 т/га среднегодового применения органических удобрений. При применении указанной системы удобрения окупаемость 1 кг NPK кормовыми единицами составила 11,6, а 1 кг д.в азота – 19,4 к.ед. (табл. 5).

Таблица 5

Влияние систем удобрения на продуктивность зернотравяно-пропашного севооборота и баланс элементов питания (1999–2004 гг.)

Среднегодовой уровень применения удобрений	Среднегодовая продуктивность, ц/га к.ед.	Прибавка от удобрений, ц/га		Оплата удобрений, к.ед.		Баланс, кг/га		
		NPK	N	NPK	N	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Без удобрений	55,1	–	–	–	–	– 41	– 40	– 107
2. 12,0 т/га НКРС – фон	63,2	8,1	–	–	–	– 13	– 21	– 73
3. N60P70	81,0	17,8	–	13,7	–	8	36	– 89
4. N60K126	83,4	20,2	–	10,8	–	6	– 37	8
5. P70 K126	73,3	10,1	–	5,1	–	– 41	42	25
6. N36P70K126	80,4	17,2	7,1	7,4	19,7	– 15	36	7
7. N60P70K126	82,2	19,0	8,9	7,4	14,8	6	36	8
8. N84P70K126	87,6	24,4	14,3	8,7	17,0	17	33	1
9. P40K88	71,5	8,3	–	6,5	–	– 27	14	– 7
10. N36P40K88	78,6	15,4	7,1	9,4	19,7	– 5	11	– 14
11. N60P40K88	82,2	19,0	10,7	1,0	17,8	5	5	– 20
12. N84P40K88	87,8	24,6	16,3	11,6	19,4	20	4	– 23
13. P20K44	69,8	6,6	–	10,2	–	– 22	– 3	– 43
14. N36P20K44	75,6	12,4	5,8	12,4	16,1	– 3	– 8	– 53
15. N60P20K44	79,4	16,2	9,6	13,0	16,0	9	– 12	– 57
НСП урж.	3,3	–	–	–	–			
НСП продукт.	1,9	–	–	–	–			

При расчете баланса элементов питания за севооборот в приходную статью включено поступление азота, фосфора и калия с органическими (N49,2P46,8K87,6) и минеральными удобрениями, осадками и семенами (N13,9P1,6K10,7), среднегодовая фиксация азота свободноживущими микроорганизмами 10,0 кг/га и среднегодовая фиксация азота клевером 22 кг/га [14]. В статью расхода: вынос элементов питания сельскохозяйственными культурами, газообразные потери азота, которые в среднем составляют 25% от общего количества, внесенного с минеральными и органическими удобрениями, вынос с инфильтрационными водами (N10K25) (табл. 5).

При применении N84P40–70K88–126 на фоне 12 т/га навоза КРС положительный баланс азота составил 17–20 кг/га, фосфора – 4–33 кг/га. В вариантах без применения азотных удобрений и при внесении N36 на фоне P20–70K44–126 баланс азота оказался отрицательный от –3 до –41 кг/га. Интенсивность баланса более 100% характерна для азота при внесении N60–84 на фоне P40,70K126.

Положительный баланс фосфора характерен для системы удобрения с N36–84P40,70K88,126 (P_2O_5 в расчете на поддерживающий и положительный баланс), и с нарастанием доз азотных удобрений баланс уменьшался.

Баланс по калию положительный только при среднегодовом внесении 126 кг/га калийных удобрений.

В вариантах с максимальной продуктивностью севооборота 87,6–87,8 ц к.ед./га при применении N84P40–70K88–126 интенсивность баланса по азоту составила 112–110, фосфору –107–150 и калию – 87–100% (табл. 5).

Результаты исследований подвижного фосфора в пахотном слое за ротацию севооборота показали, что его содержание в основном изменялось в пределах ошибки опыта с тенденцией к накоплению при внесении N36–84 P70K126 или к снижению в вариантах с внесением N36–60 P20K44 (табл. 9).

Содержание подвижного калия в пахотном слое уменьшилось на 21–41 мг/кг в вариантах без калийных удобрений и при внесении их в расчете на дефицитный баланс. Максимальное снижение содержания калия в почве на 41 мг/кг обнаружено при внесении N36P20K44 (табл. 9).

Обменная кислотность пахотного слоя за ротацию пятипольного зернотравяно-пропашного севооборота повысилась на 0,23–0,35 ед. за счет значительного выноса кальция и магния клевером луговым от 6,07–6,27 до 5,79–5,96. Содержание гумуса при внесении органических удобрений в среднегодовой дозе 12 т/га снизилось на 0,17–0,68 (табл. 10).

В зернотравяном севообороте (2003–2009 гг.) оптимальная урожайность зеленой массы горохо-овсяной смеси на уровне 390–400 ц/га формировалась при применении органо-минеральной системы удобрения – 40 т/га навоза КРС + N30–90P40,70K80,120. Эти варианты обеспечили достаточно высокие параметры окупаемости удобрений – 33,0–54,7 кг зеленой массы на 1 кг NPK и 38–166 кг зеленой массы на 1 кг азота.

Наиболее эффективными дозами минеральных удобрений под ячмень на фоне последствия 40 т/га органических удобрений являются N30P40K80 и N60 + 30P40K80. Их внесение обеспечило получение урожайности зерна в среднем за два года 51,5 и 54,1 ц/га. Последствие органических удобрений обеспечило получение дополнительной урожайности зерна ячменя 5,8 ц/га.

Коэффициенты использования элементов питания из удобрений в вариантах с оптимальной урожайностью: азота – 37%, фосфора – 32%, калия – 45%. За счет плодородия почвы формировалось 63,7–66,8%, фосфорных и калийных удобрений – 15,3–8,6, азотных – 9,8–12,2 и последствие органических удобрений – 11,8–12,4% урожайности зерна.

В среднем за два года оптимальная урожайность зерна диплоидного сорта озимой ржи Зарница 63,5 ц/га формировалась при комплексном последовательном и совместном применении средств химизации. Оптимальный срок внесения азотных удобрений – N60 весной в начале возобновления вегетации растений + N30 в стадию 1-го узла на фоне P40K80 (внесение осенью в расчете на поддерживающие балансы) и последствие 40 т/га навоза КРС. При данной системе удобрения окупаемость 1 кг NPK составила 12,4 кг и 1 кг азотных удобрений – 19,2 кг зерна.

В сумме за два укоса и в среднем за два года внесение P40K80 и P70K120 обеспечило урожайность зеленой массы клевера лугового сорт Устойливы на уровне 500–511 ц/га. Внесенные под покровную культуру озимую рожь азотные удобрения в дозах 60, 90 кг/га д.в. снижали урожайность зеленой массы клевера 1 укоса. Максимальная урожайность 511 ц/га формировалась при применении P70K120. Прибавка при сравнении с внесением P40K80 и P20K40 составила 11 ц/га и 61 ц/га соответственно. Сбор сухого вещества при оптимальной урожайности составил 103,5 ц/га, или сена получено 123,2 ц/га, кормовых единиц 107,3 ц/га. Среднегодовое содержание сырого белка в 1 укосе изменялось в зависимости от системы удобрения от 13,3 до 15,0% и во 2 укосе – от 13,6 до 17,0%.

Оптимальная урожайность зерна озимой тритикале Вольтарио 76,5 ц/га формировалась при комплексном последовательном и совместном применении средств химизации. Азотные удобрения 150 кг/га д. в. вносили в три срока (90 кг/га весной при возобновлении вегетации растений + 30 кг/га в фазу 1 узел стеблевания + 30 кг/га в фазу последний лист) на фоне фосфорных и калийных в расчете на поддерживающие балансы P40K80 и последствие 40 т/га органических удобрений. При данной системе удобрения прибавка зерна от NPK составила 33,7 ц/га, в том числе от азотных удобрений 27,0 ц/га, при оплате 1 кг NPK 12,5 кг и 1 кг азота – 18,0 кг зерна. **Последствие органических удобрений (40 т/га) не оказало достоверного влияния на урожайность зерна озимой тритикале.**

Максимальная продуктивность зернотравяного севооборота (2003–2009 гг. – пятая ротация) 90,7 ц/га к.ед. формировалась при применении органо-минеральной системы удобрения (среднегодовое внесение 8 т/га навоза крупного рогатого скота + N84P70K120). Азотные удобрения вносили в два и три срока. За счет NPK дополнительно получено 25,5 ц/га к.ед. при окупаемости 1 кг удобрений 9,3 кг к.ед. Однако оптимальная (достоверная) продуктивность 89,4 ц/га к.ед. формировалась также при применении органо-минеральной системы удобрения, но при внесении минеральных удобрений в дозе N84P40K80 на фоне органических. При применении данной системы удобрения получена прибавка от NPK 24,2 ц/га к.ед., в том числе за счет действия азотных удобрений – 11,8 ц/га к.ед., при оплате 1 кг NPK 11,9 кг, а 1 кг азотных удобрений – 14,0 кг к.ед. (табл. 6).

При применении азотных (N36, 60) удобрений на фоне фосфорных и калийных в расчете на дефицитные балансы (P20K40) недобор продукции по сравнению с оптимальной по продуктивности системой удобрения составил 8,2 и 6,5 ц/га к.ед.

Таблица 6

Продуктивность зернотравяного севооборота и баланс элементов питания (2003–2009 гг.)

Вариант	Продуктивность, ц/га к.ед.	Прибавка от удобрений, ц/га к.ед.		Оплата к.ед. 1 кг		Баланс, кг/га		
		NPК	N	NPК	N	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Без удобрений	57,7	–	–	–	–	– 20,7	– 38,4	– 98,3
2. 8 т/га НКРС – фон	65,2	7,5	–	0,9	–	5,9	– 14,2	– 66,9
3. N ₆₀ P ₇₀	82,3	17,1	–	13,2	–	27,1	42,8	– 80,9
4. N ₆₀ K ₁₂₀	80,3	15,1	–	8,4	–	30,7	– 23,2	2,1
5. P ₇₀ K ₁₂₀	77,7	12,5	–	6,6	–	– 4,2	45,8	– 3,9
6. N ₃₆ P ₇₀ K ₁₂₀	87,5	22,3	9,8	11,7	27,2	8,4	35,8	– 16,9
7. N ₆₀ P ₇₀ K ₁₂₀	86,3	21,1	8,6	8,4	14,3	30,3	40,8	– 17,9
8. N ₈₄ *P ₇₀ K ₁₂₀	90,7	25,5	13,0	9,3	15,5	27,6	34,8	– 24,9
9. P ₄₀ K ₈₀	77,6	12,4	–	10,3	–	– 5,0	14,8	– 36,9
10. N ₃₆ P ₄₀ K ₈₀	86,8	21,6	9,2	13,8	25,6	12,1	9,8	– 50,9
11. N ₆₀ P ₄₀ K ₈₀	87,3	22,1	9,7	12,3	16,2	24,1	7,8	– 49,9
12. N ₈₄ *P ₄₀ K ₈₀	89,4	24,2	11,8	11,9	14,0	34,3	7,8	– 53,9
13. P ₂₀ K ₄₀	72,3	7,1	–	11,8	–	– 3,8	– 1,2	– 57,9
14. N ₃₆ P ₂₀ K ₄₀	81,2	16,0	8,9	16,7	24,7	13,9	– 5,2	– 61,9
15. N ₆₀ P ₂₀ K ₄₀	82,9	17,7	10,6	14,8	17,7	27,8	– 4,2	– 54,9
НСР ₀₅	1,7							

Примечание. Внесение азотных удобрений в два срока.

При расчете баланса элементов питания [15] в приходную статью включено поступление азота, фосфора и калия с органическими (N38,4P31,2K58,4) и минеральными удобрениями, осадками и семенами (N13,9P1,6K10,7), среднегодовая фиксация азота свободноживущими микроорганизмами 15,0 кг/га и среднегодовая фиксация азота 1 ц зеленой массы клевера лугового 0,35 кг азота и горохо-овсяной смеси – 0,20 кг. В статью расхода: вынос элементов питания сельскохозяйственными культурами, газообразные потери азота, которые

в среднем составляют 25% от общего количества, внесенного с минеральными и органическими удобрениями, вынос с инфильтрационными водами (N10K25) (табл. 6).

Баланс азота в зернотравяном севообороте с горохо-овсяной смесью и клевером луговым отрицательный в варианте без минеральных и органических удобрений, а также при внесении P20–70K40–120 (без азотных удобрений), в остальных вариантах он положительный – от 5,9 (фон) до 34,3 кг/га при его интенсивности 105–120%.

Баланс фосфора отрицательный при внесении фосфорных удобрений в расчете на дефицит от –1,2 до – 5,2 кг/га, в фоновом варианте (–14,2 кг/га) и без удобрений (–38,4 кг/га), при внесении N60K120 (–23,2 кг/га). Положительный баланс фосфора изменялся в пределах от 7,8 до 45,8 кг/га при интенсивности баланса 112–180%.

Баланс калия положительный (2,1 кг/га) только при внесении N60K120 на фоне 8 т/га органических удобрений и отрицательный во всех остальных вариантах опыта от –3,9 кг/га (при внесении P70K120) до –98,3 кг/га (без удобрений). Отрицательный баланс калия в зернотравяном севообороте объясняется очень высоким выносом калия горохо-овсяной смесью и клевером луговым. Баланс по калию отрицательный при возделывании горохо-овсяной смеси в пределах 88–167 кг/га, а по клеверу – 225 – 350 кг/га (табл. 6).

Содержание подвижных фосфора и калия в пахотном слое за ротацию в основном изменялось в пределах ошибки опыта с тенденцией или достоверным снижением на 5–32 мг/кг и на 20–57 мг/кг почвы соответственно. Кислотность пахотного слоя повысилась на 0,01–0,18 ед., содержание гумуса изменялось в пределах ошибки опыта (табл. 9, 10).

Максимальная среднегодовая продуктивность сельскохозяйственных культур 78,4 ц к.ед./га за пять ротаций получена при применении N94P86K138 и N106P53K94, при этом 25,1 ц к.ед./га формировалось за счет NPK, окупаемость 1 кг NPK составила 7,9 к.ед. и 9,9 к.ед. соответственно (табл. 7). Органические удобрения повысили продуктивность изучаемых севооборотов на 6,6 ц к.ед./га (4,5–8,1 ц к.ед./га по ротациям). При применении парной комбинации фосфорных и калийных удобрений (P72K119) продуктивность севооборотов повысилась на 9,1 ц к.ед./га. Максимальная эффективность среднегодового применения P72K119 отмечена в первой ротации (1987–1991 гг.) 9,2 ц к.ед./га, в четвертой – 10,1 ц к.ед./га и пятой – 12,5 ц к.ед./га. Внесение NP и NK обеспечивало прибавку среднегодовой продуктивности севооборотов в среднем на 16,8 и 17,7 ц к.ед./га соответственно, что на 7,7 и 8,6 ц к.ед./га выше, чем применение PK.

В среднем за пять ротаций внесение азотных удобрений увеличило продуктивность на 10,4–16,0 ц к.ед./га: N49 – на 10,4 ц к.ед./га, N78 – на 12,6 ц к.ед./га. Фосфорные удобрения увеличили продуктивность культур на 4,0 ц к.ед./га, а калийные – на 4,9 ц к.ед./га. Более высокая среднегодовая продуктивность сельскохозяйственных культур в пятой ротации была обусловлена высокой урожайностью клевера лугового и отзывчивостью новых сортов зерновых культур на внесенные минеральные удобрения. Среднегодовая продуктивность культур во второй и третьей ротациях практически во всех вариантах была на одном уровне. Продуктивность в варианте без внесения удобрений в третьей ротации зернопашного севооборота снизилась по отношению к первой на 15,1 ц к.ед./га (табл. 7).

Таблица 7

Продуктивность зернопропашных (1, 2 и 3), зернотравяно-пропашного (4) и зернотравяного (5) севооборотов при возделывании на дерново-подзолистой супесчаной почве (1987–2009 гг.)

Среднегодовой уровень применения удобрений, кг/га д.в.	Среднегодовая продуктивность севооборотов, ц к.ед./га						Прибавка от удобрений, ц к.ед./га		Окупаемость 1 кг д.в. удобрений, к.ед.	
	1	2	3	4	5	средняя	НРК	N	НРК	N
1. Без удобрений	48,9	37,7	33,8	55,1	57,7	46,7		–	–	–
2. Навоз КРС – 14,8 т/га – фон	54,5	42,5	41,7	63,2	65,2	53,3	6,6	–	0,7	–
3. N78P72	72,4	58,0	56,8	81	82,3	70,1	16,8	–	11,2	–
4. N78K119	75,4	60,7	54,8	83,4	80,3	71,0	17,7	–	9,0	–
5. P72K119	63,7	48,0	49,2	73,3	77,7	62,4	9,1	–	4,8	–
6. N49P72K119	79,7	60,2	56,7	80,4	87,5	72,9	19,5	10,4	8,1	21,2
7. N78P72K119	85,7	61,2	59,8	82,2	86,3	75,0	21,7	12,6	8,1	16,2
8. N94*P86K138	89,0	62,5	62,6	87,6	90,7	78,4	25,1	16,0	7,9	17,0
9. N37P53K94	87,7	65,4	49,5	71,5	77,6	70,3	16,9	–	9,2	–
10. N61P53K104	86,4	63,6	58,9	78,6	86,8	74,9	21,6	–	9,9	–
11. N78P66K114	84,7	62,9	57,5	82,2	87,3	74,9	21,6	–	8,4	–
12. N106*P53K94	87,9	65,0	61,7	87,8	89,4	78,4	25,0	–	9,9	–
13. N 49P54K87	88,5	66,3	48,6	69,8	72,3	69,0	15,7	–	8,3	–
14. N74P40K67	82	62,4	55,8	75,6	81,2	71,3	18,0	–	10,0	
15. N90P54K87	79,2	62,1	56,7	79,4	82,9	72,0	18,7	–	8,1	
НСР ₀₅	3,1	1,9	2,0	3,3	1,7	2,6				

Примечание. Дробное внесение азотных удобрений в два или три срока.

Баланс азота при возделывании пяти севооборотов (три зернопропашных (1, 2 и 3), зернотравяно-пропашной (4) и зернотравяной (5)) при среднегодовой продуктивности культур 46,7–78,4 ц/га к.ед. и среднегодовом внесении 14, 8 т/га севооборотной площади органических удобрений положительный от 6,7 до 43,6 кг/га во всех вариантах [15]. При этом его интенсивность изменялась в пределах 104–129%. Отрицательный баланс (–20,0 кг/га) азота только в варианте без удобрений.

Баланс фосфора положительный от 35,8 кг/га до 78 кг/га во всех вариантах со среднегодовым внесением фосфорных удобрений в дозах 40–86 кг д.в./га. Отрицательный баланс отмечен в вариантах без применения фосфорных удобрений и изменялся он от –3 (при внесении N78K119) до –25,3 кг/га в варианте без удобрений. Интенсивность баланса варьировалась от 103 до 301%.

Баланс калия отрицательный в вариантах 1–3, 9, 12–15 от –7,1 при среднегодовом применении K94 до –98 кг/га в варианте без удобрений. Положительный баланс калия характерен для вариантов со среднегодовым внесением

калийных удобрений в дозах 104–138 кг д.в./га. Интенсивность баланса изменялась от 10 до 137%.

В среднем за пять севооборотов разностным методом посчитаны коэффициенты использования элементов питания из удобрений. Так, в оптимальных по продуктивности вариантах при внесении **N94P86K138** и **N106 P53K94** коэффициент использования азота из удобрений составил 55% и 57%, фосфора – 17 и 26%, калия – 59 и 86%, что согласуется и с приведенными балансовыми расчетами (табл. 8).

Таблица 8

Среднегодовой баланс элементов питания за пять севооборотов на дерново-подзолистой супесчаной почве

Вариант	Азот		Фосфор		Калий		Коэффициенты использования элементов питания из удобрений, %		
	баланс, ± кг/га	ИБ*, %	баланс, ± кг/га	ИБ, %	баланс, ± кг/га	ИБ, %	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	- 20,0	69	- 25,3	6	- 98	10	-	-	-
2	22,3	124	1	103	- 32,2	75	-	-	-
3	43,6	129	68,3	263	- 71,7	57	49	15	-
4	39,4	126	- 3	93	30	116	54	-	48
5	13,1	113	73,6	301	57,3	137	-	7	25
6	24,1	117	66,3	251	32,1	118	77	17	46
7	34,2	122	65,9	249	23,3	112	62	18	53
8	40,6	124	78,2	271	24,3	112	55	17	59
9	7,0	105	40,1	194	- 7,1	96	123	26	73
10	25,3	117	39,3	190	3,8	102	74	27	65
11	33,6	121	45,6	203	16,1	108	62	25	58
12	42,1	124	46,1	202	- 19,1	91	57	26	86
13	6,7	104	48,9	213	- 22,5	89	109	22	89
14	27,0	117	35,8	184	- 27,3	86	69	28	71
15	38,9	123	49,3	215	- 9,7	95	57	21	74

Примечание. ИБ – интенсивность баланса.

Содержание подвижного фосфора (по Кирсанову) за 22 года возделывания сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистой супесчаной почве в пахотном слое повысилось на 45–130 мг/кг почвы во всех вариантах с применением фосфорных удобрений в дозах 40–86 кг/га д.в. За указанный период его содержание в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы в вариантах, где не применяли фосфорные удобрения, снизилось на 12–27 мг/кг (0,55–1,23 мг/кг почвы в год). Максимальное снижение фосфора в почве отмечено в варианте без удобрений. Практически повышение запасов подвижного фосфора в пахотном слое на 12–146 мг/кг почвы происходило на протяжении возделывания сельскохозяйственных культур в трех 4-польных зернопропашных севооборотах (табл. 9).

Таблица 9

Влияние систем удобрения на изменение содержания фосфора и калия в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы за пять севооборотов

Вариант	1986–1987 г.		1990–1991 г.		1994–1995 г.		1998–1999 г.		2003–2004 г.		2008–2009 г.	
	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Без удобрений	155	216	159	132	166	117	172	112	153	111	128	69
2. Навоз КРС – 14,8 т/га – фон	163	212	170	136	174	132	190	148	170	126	151	95
3. N78P72	146	186	228	106	208	126	246	150	230	105	225	72
4. N78K119	169	208	168	163	162	180	181	220	165	262	149	231
5. P72K119	124	212	240	218	223	220	268	258	254	287	254	241
6. N49P72K119	134	212	232	174	228	180	262	225	269	264	264	223
7. N78P72K119	137	190	238	172	234	186	281	216	282	257	260	214
8. N94*P86K138	144	172	262	209	272	213	290	227	283	254	266	218
9. N37P53K94	144	230	248	166	241	190	274	230	270	265	241	217
10. N61P53K104	152	210	238	207	254	242	266	246	251	250	240	203
11. N78P66K114	160	190	281	211	282	222	290	228	266	219	234	162
12. N106*P53K94	159	239	240	156	237	179	265	213	239	210	222	166
13. N49P54K87	151	182	254	182	255	210	279	228	241	216	223	171
14. N74P40K67	140	219	234	153	236	174	257	192	222	167	207	147
15. N90P54K87	148	176	252	182	256	196	267	202	217	156	193	116
НСР	41	30	43	35	45	37	38	33	35	22	37	24,4

Таблица 10

Влияние удобрений на изменение содержания гумуса и кислотности пахотного слоя дерново-подзолистой супесчаной почвы за пять севооборотов

Вариант	1986–1987		1990–1991		1994–1995		1998–1999		2003–2004		2008–2009	
	pH _{KCl}	гумус, %										
1. Без удобрений	6,04	2,35	5,84	2,61	6,16	2,62	6,18	3,04	5,88	2,62	5,85	2,71
2. Навоз КРС – 14,8 т/га – фон	6,09	2,59	5,82	2,74	6,20	2,98	6,27	3,19	5,96	2,78	5,95	2,84
3. N78P72	5,98	2,51	5,74	2,72	6,12	3,06	6,18	3,36	5,85	2,84	5,78	2,90
4. N78K119	5,92	2,65	5,95	2,88	6,10	3,08	6,19	3,25	5,88	3,03	5,87	2,98
5. P72K119	5,89	2,99	5,70	3,13	6,28	3,00	6,24	3,19	5,91	2,85	5,85	2,91
6. N49P72K119	5,95	2,48	5,64	2,79	6,23	2,99	6,21	3,19	5,86	2,94	5,76	2,97
7. N78P72K119	5,90	2,54	5,69	2,80	6,17	3,11	6,15	3,20	5,84	2,82	5,72	2,94
8. N94*P86K138	5,98	2,64	5,73	2,96	6,14	2,96	6,13	3,20	5,79	2,90	5,61	2,91
9. N37P53K94	6,03	2,36	5,79	2,82	6,14	3,09	6,19	3,08	5,88	2,91	5,81	2,91
10. N61P53K104	5,64	2,62	5,73	3,05	6,02	3,13	6,11	3,44	5,84	2,91	5,79	2,96
11. N78P66K114	5,74	2,63	5,72	3,04	6,02	3,13	6,14	3,41	5,81	2,92	5,71	2,95
12. N106*P53K94	6,00	2,66	5,80	2,96	6,07	3,17	6,07	3,29	5,80	2,99	5,73	3,02
13. N 49P54K87	5,97	2,49	5,69	2,85	6,11	3,05	6,26	3,33	5,91	2,95	5,93	2,94
14. N74P40K67	5,79	2,60	5,73	2,95	6,02	3,01	6,12	3,50	5,84	3,01	5,84	3,12
15. N90P54K87	5,89	2,58	5,77	2,86	6,02	2,88	6,11	3,50	5,88	2,82	5,79	2,97
НСР	0,13	0,38	0,12	0,36	0,13	0,34	0,12	0,40	0,10	0,31	0,11	2,71

Содержание калия в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы увеличилось или наблюдалась тенденция к его увеличению на 11–46 мг/кг почвы в вариантах со среднегодовым применением калийных удобрений в дозах 119–138 кг/га д.в. Максимальное снижение содержания подвижного калия в пахотном слое на 147 мг/кг почвы (6,7 мг/кг почвы в год) отмечено в варианте без удобрений. При применении органической системы удобрения (среднегодовое применение 14,8 т/га) содержание калия снизилось на 117 мг/кг почвы (5,3 мг/кг в год). Таким образом, внесение калийных удобрений в дозах 67–114 кг/га д.в. при продуктивности севооборотов на уровне 69–78 ц/га к.ед. не обеспечивает сохранение подвижного калия в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы (табл. 9).

Кислотность пахотного слоя сохранялась практически на одном уровне при возделывании трех ротаций зернопропашного севооборота (1, 2, 3) с изменениями в пределах ошибки опыта. Кислотность пахотного слоя при введении в зернотравяно-пропашной севооборот клевера лугового, который потребляет большое количество кальция и магния, повысилась на 0,23–0,35 ед. по сравнению с 1998/1999 гг. При возделывании зернотравяного севооборота с клевером луговым и пелюшко-овсяной смесью кислотность пахотного слоя (за две ротации 1998–2009 гг.) увеличилась на 0,28–0,52 ед. (вар. 8) по сравнению с 1998, 1999 гг. (табл. 10).

Содержание гумуса в пахотном слое при среднегодовом применении 14,8 т/га органических удобрений за 22 года исследований повысилось на 0,26–0,56%, т.е. практически изменялось или в пределах ошибки опыта, или сохранялось на первоначальном уровне, или несколько увеличилось (табл. 10).

ВЫВОДЫ

1. При возделывании на дерново-подзолистой супесчаной почве пяти (трех зернопропашных, зернотравяно-пропашного и зернотравяного) севооборотов (1987–2009 гг.) в варианте без удобрений при среднегодовой продуктивности 46,7 ц к.ед./га снизилось содержание подвижного фосфора на 27 мг/кг почвы (1,23 мг/кг ежегодно) и калия – на 144 мг/кг (6,5 мг/кг почвы ежегодно); кислотность почвенной среды пахотного слоя увеличилась на 0,32 ед., содержание органического вещества сохранилось на первоначальном уровне.

2. Среднегодовое применение 14,8 т/га органических удобрений обеспечило продуктивность сельскохозяйственных культур 53,3 ц к.ед./га при сохранении содержания органического вещества и обменной кислотности на первоначальном уровне, а содержание подвижных фосфора и калия при этом снизилось на 12 мг/кг и 117 мг/кг почвы соответственно.

3. При оптимальной в опыте продуктивности 78,4 ц к.ед./га при среднегодовом внесении **N94P86K138** и **N106P53K94** на фоне **14,8 т/га органических удобрений** кислотность пахотного слоя и содержание подвижного фосфора повысились на 0,37 и 0,27 ед. и на 122 и 73 мг/кг почвы соответственно при сохранении содержания органического вещества. Содержание подвижного калия при среднегодовом внесении **N94P86K138** повысилось на 46 мг/кг, при внесении **N106P53K94** снизилось на 72 мг/кг.

4. На дерново-подзолистой супесчаной почве с оптимальным содержанием подвижных фосфора и калия при возделывании новых интенсивных сортов сельскохозяйственных культур и при среднегодовой продуктивности двух севооборотов (4 и 5) на уровне 71,1 ц к.ед./га (среднегодовое применение P20K42) – 88,6 ц к.ед./га (среднегодовое применение N84P40K82) внесение фосфорных и калийных удобрений в дозах P20,40K42,84 (и на их фоне азотных (N36–84)) не обеспечивает сохранение содержания этих элементов на первоначальном уровне. За два пятипольных севооборота содержание подвижного фосфора уменьшилось на 14–74 мг/кг почвы, подвижного калия – на 13–80 мг/кг почвы.

5. Проведение длительного стационарного полевого опыта позволило получить надежные и объективные данные по оценке влияния применения удобрений на продуктивность сельскохозяйственных культур на протяжении нескольких ротаций севооборотов и изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой супесчаной почвы, которые дают возможность прогнозировать изменение агрохимических свойств почв на перспективу, определить оптимальные размеры интенсивности баланса основных элементов питания. При этом определяется и роль погодных условий в формировании продуктивности сельскохозяйственных культур. Все эти вопросы невозможно решить в обычных краткосрочных полевых опытах. Поэтому считаем, что длительные полевые опыты представляют очень большую ценность для агрохимической науки и их необходимо иметь по возможности хотя бы по 1–2 для основных почвенных разновидностей и для почвенно-климатических зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагин, А.М. Влияние длительного применения различных систем удобрения в севообороте на изменение агрохимических свойств и окультуренность почвы // Эффективность удобрений, урожайность сельскохозяйственных культур и плодородие почв. – Горки: БСХА, 1989. – С. 9–23.
2. Кулаковская, Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений / Т.Н. Кулаковская. – М.: Агропромиздат, 1990. – 219 с.
3. Воспроизводство плодородия почвы при длительном применении удобрений и севооборота / А.М. Лыков [и др.] // Повышение плодородия почв и получение запланированных урожаев сельскохозяйственных культур. – М., 1985. – С. 16–22.
4. Минеев, В.Г. Плодородие и биологическая активность дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений и их последствии / В.Г. Минеев, Н.Ф. Гомонова, М.Ф. Овчинникова / Агрохимия. – 2004. – № 7. – С. 5–10.
5. Минеев, В.Г. Агрохимия, биология и экология почвы / В.Г. Минеев, Е.Х. Ремпе. – М.: Росагропромиздат, 1990. – 206 с.
6. Организационно-технологические нормативы возделывания сельскохозяйственных культур: сборник отраслевых регламентов / Ин-т аграр. экономики НАН Беларуси; рук. разработ.: В.Г. Гусаков [и др.]. – Минск: Бел. наука, 2005. – 460 с.
7. Агроклиматические ресурсы Белорусской ССР. – Минск, 1985. – 235 с.

8. Лапа, В.В. Продуктивность сельскохозяйственных культур и баланс элементов питания в севообороте на дерново-подзолистой супесчаной почве в зависимости от доз и соотношений минеральных удобрений / В.В. Лапа, Н.Н. Ивахненко // Агрохимия. – 1995. – № 6. – С. 53–62.

9. Продуктивность зернового севооборота и плодородие дерново-подзолистой почвы при различных системах применения удобрений / В.В. Лапа [и др.] // Агрохимия. – 2003. – № 1. – С. 20–29.

10. Лапа, В.В. Продуктивность зернотравяно-пропашного севооборота и плодородие дерново-подзолистой супесчаной почвы при применении различных систем удобрения / В.В. Лапа, Н.Н. Ивахненко, А.А. Бавтрук // Агрохимия. – 2009. – № 6. – С. 22–31.

11. Продуктивность зернотравяного севооборота и плодородие дерново-подзолистой супесчаной почвы при применении различных систем удобрения / В.В. Лапа [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 1(46). – С. 89–104.

12. Лапа, В.В. Продуктивность севооборотов и изменение плодородия дерново-подзолистой супесчаной почвы при длительном применении удобрений / В.В. Лапа, Н.Н. Ивахненко // Агрохимия. – 2012. – № 9. – С. 41–48.

13. Методические указания по расчету баланса азота, фосфора, калия, кальция и магния в земледелии БССР / В.В. Лапа [и др.]. – Минск, 1990. – 20 с.

14. Методика расчета баланса элементов питания в земледелии Республики Беларусь / В.В. Лапа [и др.]; Белорусский научный центр информации и маркетинга АПК. – Минск, 2001. – 20 с.

15. Методика расчета баланса элементов питания в земледелии Республики Беларусь / В.В. Лапа [и др.]. – Минск, 2007. – 26 с.

PRODUCTIVITY OF CROP ROTATIONS, NUTRIENTS BALANCE AND FERTILITY LEVEL OF LUVISOL LOAMY SAND SOIL UNDER LONG-TERM FERTILIZATION

V.V. Lapa, N.N. Ivakhnenko

Summary

In the long-term field experiment (5 crop rotations) on Luvisol loamy sand soil the effect of mineral fertilizer doses and ratios on crop productivity and dynamics of agrochemical properties of arable horizon was studied. It was established that maximal annual productivity of crop rotation – 78,4 c f.u./ha – was obtained as a result of annual application of N94P86K138 and N106P53K94 at background of FYM (14,8 t/ha). At these treatments the increase of acidity level and mobile phosphate content by 0,37 and 0,27 units was observed as well as by 122 and 73 mg/kg respectively under the conservation of soil organic matter. As a result of annual application of N94P86K138 the mobile potassium content was increased by 46 mg/kg, and under application of N106P53 K94 mobile potassium content was reduced by 72 mg/kg.

Поступила 26.11.13