

УДК 631.1:631.55:633.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
ПЛОДОРОДИЕМ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ
ИЗУЧЕНИЯ РЯДОВ УРОЖАЙНОСТИ В ДЛИТЕЛЬНЫХ
ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ**

В.А. Романенков

ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова,
Россия, 127550, Москва, ул. Прянишникова, 31а, viua@online.ru

Резюме. На основе сопоставления урожайности зерновых культур, получаемой в различных вариантах трех полевых опытов с удобрениями, и урожайности при оптимальном питании, рассчитанном на основе моделирования. Оценено варьирование урожайности во времени. Результаты показывают возможности как последовательного возрастания урожайности с увеличением дисперсии, так и снижения урожайности и дисперсии под действием исследуемых факторов. Выявлено не только возрастание абсолютной величины, но и стабильности урожаев за счет внесения минеральных и органических удобрений, как в прямом действии, так и в последствии. Анализ изменения во времени потенциала продуктивности зерновых позволил выявить эффект благоприятных и неблагоприятных лет в отношении погоды, а также эффект прекращения внесения удобрений.

Ключевые слова. Длительные полевые опыты, потенциал продуктивности, устойчивость урожаев, моделирование.

**STUDY OF EFFICIENCY OF PRODUCTIVITY MANAGEMENT
IN AGROECOSYSTEMS BASED ON ANALYSIS OF YIELD
SERIES IN LONG-TERM FIELD EXPERIMENTS**

V.A. Romanenkov

D.N. Pryanishnikov All-Russian Institute for Agrochemistry,
31a, Pryanishnikova str., 127550, Moscow, Russia, viua@online.ru

Summary. Grain yield data of three field experiments with fertilizers were compared to the yield under optimal nutrition calculated using a model. Yield variability with time was assessed. The results showed possibility of yield and its variance concurrent increase as well as possibility of their consistent decrease due to analyzed factors. The results showed the effect and aftereffect of mineral and organic fertilization both on growth in yield absolute values and their stability. Analysis of trends in the yield potential of cereals demonstrated effects of favorable and unfavorable years (in regard to weather conditions) on crops as well as the effect of cessation of fertilization.

Keywords. Long-term field experiments, yield potential, yield sustainability, modeling.

Введение

Одной из основных проблем, возникающих при анализе межгодовой изменчивости продуктивности культур в длительных полевых опытах, является выделение неконтролируемых факторов из комплекса факторов, определяющих конечный урожай, и, прежде всего, погодной составляющей урожайности. Многолетний ряд данных, получаемый в длительных опытах, включающий широкий диапазон реализаций погоды, является весьма перспективным для получения представлений об устойчивости функционирования системы «почва – погодные условия – продуктивность», но требует анализа диапазона изменчивости каждого из влияющих факторов (Фрид, 2003; Стребков и др., 1988; Сысуев, Мухамадьяров, 2001; Ранькова, 1976; Стребков, 1989). Учитывая новые задачи, ставшие актуальными в связи с глобальными изменениями климата, необходимо оценивать длительные последствия мероприятий по управлению плодородием в регулировании условий роста и развития растений таким образом, чтобы максимально использовать изменяющиеся климатические ресурсы и нейтрализовать, насколько это оказывается возможным, отрицательные эффекты. Использование данных длительных полевых опытов, в которых ведется сопряженный мониторинг растительных, климатических и почвенных показателей, оказывается актуальным для обоснованного выбора адаптационных мер в растениеводстве, связанных с развитием глобального изменения климата (Сиротенко, 2004; Сиротенко и др., 2008). Если удастся описать динамику продуктивности варианта опыта, связанную с изменением плодородия почвы, любая модель продукционного процесса, даже не включающая контролируемые факторы, исследуемые в опыте, может быть расширена за счет использования функциональных зависимостей, учитывающих комплексное воздействие агротехнических факторов, что значительно повышает практическую ценность прогнозных расчетов на основе подобной модели.

Объекты и методика исследования

Опыт Долгопрудной агрохимической опытной станции (ДАОС) (г. Долгопрудный, Московская область) № 1 «Сравнительная эффективность навоза и минеральных удобрений» закладки 1931 г. Четырехпольный севооборот первого опыта «черный пар – озимая пшеница (рожь) – пропашные (картофель, кормовая свекла, подсолнечник) – овес», проводится в 4 полях. Для расчетов и моделирования использованы данные по урожайности овса 1931-1997 гг. всех 4 полей по следующим вариантам:

- абсолютный контроль;
- навоз 36 т/га за ротацию, внесение по 12 т/га под каждую культуру;

- полное минеральное удобрение (NPK) на фоне извести, внесение минеральных удобрений в дозах эквивалентных содержанию в навозе;
- навоз 18 т/га + NPK в эквиваленте 18 т/га навоза за ротацию на фоне извести.

Черный пар сменил занятый пар после 5 ротаций, в 1950 г. (Хлыстовский, 1992). Опыты Центральной опытной станции (ЦОС) ВНИИА (Барыбино, Домодедовский район, Московская область) «Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв» (опыт 1) последовательной закладки 1964-1966 гг. и «Эффективность удобрений при комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте» (опыт 2) последовательной закладки 1960-1962 гг. Четырехпольный севооборот первого опыта «картофель – озимая пшеница – картофель – ячмень» проводится в 3 полях. Для расчетов и моделирования использованы данные по урожайности ячменя в 1968-1999 гг. всех 3 полей по следующим вариантам:

- абсолютный контроль;
- навоз 50 т/га под пропашные (Н);
- NPK, внесение полного минерального удобрения в дозе, эквивалентной содержанию в навозе и втрое большей (3 NPK);
- навоз совместно с двойной дозой NPK (Н+2NPK).

Одинарная доза N минеральных удобрений, вносимых под ячмень, составляла в разные годы 26-39 кг/га. С 1992 г., после прекращения внесения удобрений, изучается последствие (Алиев и др., 2011).

Севооборот второго опыта «вики-овсяная смесь – озимая пшеница – картофель – ячмень с подсевом клевера – клевер – озимая пшеница проводится в 3 полях. Для расчетов и моделирования использованы данные 1965-1998 гг. по урожайности по следующим вариантам: навоз 10 т/га +N63P43K66 (средняя доза за севооборот) – Н+NPK, а также внесение на этом фоне гербицидов (с 1965 г.), гербицидов совместно с ретардантами и фунгицидами (с 1984 г.). При этом доза азотных удобрений, вносимых под ячмень, составляла в разные годы 35-85 ц/га (Ефремов, 2011).

Все из перечисленных выше опытов являются продолжающимися, выбор каждого из временных промежутков для моделирования обусловлен наличием электронной базы сопряженных данных опыта.

Моделирование продуктивности сельскохозяйственных культур основывалось на компьютерной имитационной модели «Климат – Почва – Урожай» (Сиротенко, 1981). Модель представляет собой замкнутую систему дифференциальных уравнений, численно интегрируемых с суточным временным шагом в течение вегетационного

периода культуры. Моделировались процессы формирования биомассы отдельных органов (листья, стебли, корни, зерно) и динамика составляющих баланса влаги и минерального азота в почве. Информационной базой для проведения расчетов по модели послужили локальные ежедневные метеоданные, полученные на метеорологических постах длительных опытов или ближайших метеостанциях. Как правило, доступными являлись данные по среднесуточной температуре и (или) минимальной и максимальной суточной температуре, ежедневному количеству осадков.

Моделируемыми показателями продуктивности, использованными в последующих расчетах, являлись урожайность яровой культуры при оптимальном минеральном питании (прежде всего – азотном на достаточном РК фоне) и при частичном азотном стрессе.

На основе сопоставления динамики фактической урожайности, получаемой в различных вариантах опыта и урожайности при оптимальном минеральном питании, рассчитанной моделью, вычисляли отношение:

$$W = Y/Y_N \quad (1),$$

где Y – фактическая урожайность,

Y_N – урожайность при оптимальном N питании. Показатель изменяется от 0 до 1; 1 соответствует реализации условий оптимального питания растений, 0 – отсутствию урожайности.

Для каждого года исследований рассчитывали с помощью модели «Климат – Почва – Урожай» величину Y_N и Y_{Nlim} (N-лимитированную урожайность), затем вычисляли W по формуле (1). Модель настраивалась с использованием соответствия значений урожайности, получаемой по модели при лимитировании азотного питания урожайности контрольных вариантов анализируемых опытов. Кривые динамики W построены в графическом модуле программы Statistica 5 с последующим сглаживанием методом минимализации средневзвешенного квадрата отклонений.

Ранее данный показатель использовался для расчетов возможностей агротехнического регулирования условий минерального питания в заданных агрометеорологических условиях, на основе средне-областных статистических данных (Сиротенко, Абашина, 1982). В применении к локальным условиям проведения длительного опыта он может не только показывать степень обеспеченности азотом в заданных агрометеорологических условиях, но и характеризовать изменчивость реализации продуктивности культуры в зависимости от динамики обеспеченности питательными элементами, что косвенно характеризует уровень плодородия почвы. В отличие от средне-областной статистики в полевом опыте предполагается единая система используемых элементов агротехнологии,

поэтому, при нормировании фактической урожайности расчетной оптимальной величиной появляется возможность оценить динамику потребности растений в питательных элементах с допущением нестационарности климата и плодородия, а также сравнить реализацию этих потребностей в различных вариантах длительных полевых опытов.

Анализ влияния изменения продуктивности культуры за время проведения полевого опыта возможен на основе метода EV-диаграмм для скользящих оценок средних (E) и дисперсий (V). Метод использован Сиротенко (2007) в качестве оценки текущих изменений климата на продуктивности сельского хозяйства. В приложении к исследованиям длительного полевого опыта появляется возможность сравнительной оценки изменений как климатически обусловленной урожайности, получаемой по модели «Климат – Почва – Урожай», так и реальной урожайности, лимитированной условиями минерального питания растений. Расчеты средних и средних квадратических отклонений урожайности по различным скользящим периодам выполнены в программе Excel.

Оптимальным периодом осреднения для температуры и осадков в агрометеорологии считается обычно интервал в 15-20 лет, но, как показывают последние исследования, при учете воздействия изменений климатических условий выбор оптимального периода осреднения является функцией от скорости их изменения (Сиротенко, 2007). С учетом периода установления равновесия для полевых опытов в Нечерноземной зоне, требующего, например, для органического углерода почвы не менее 10-20 лет (Романенков и др., 2009) нами использовался период осреднения 10 лет.

Результаты

Как видно из анализа показателя W в опыте ДАОС, ряд урожайности овса достигает состояния, близкого к стационарному, на что потребовалось около 30 лет (рис. 1). Разумеется, реальные данные обнаруживают колебания по годам наблюдений, но выбранная процедура сглаживания дает возможность сравнить скорость изменения W во времени опыта. Размах колебаний в данном случае обусловлен тем, что оптимизация минерального питания растений непосредственно зависит от агрометеорологических условий.

Как правило, наибольших значений относительное увеличение урожайности при постоянной дозе N удобрений достигает в неблагоприятные годы. Чтобы проиллюстрировать это положение, используем данные по азотно-лимитированному уровню урожайности, также являющегося выходными данными моделирования. N -лимитированная урожайность и W связаны обратной зависимостью (r отрицателен, по абсолютной величине = 0,48-0,56, значим при 95%-ном уровне значимости). Корреляция растет при исключении 1931-1951 гг. (r по абсолютной величине = 0,64-0,70). Таким обра-

зом, в первые 20 лет исследования эффективность оптимизации минерального питания растений менее выражена на фоне изменения уровня плодородия почвы. В последующем, когда абсолютные изменения W снизились, выявляется, что при неблагоприятных погодных условиях формируемая вегетативная масса растений меньше вследствие лимитирования ростовых процессов, следовательно, снижения потребности растений в элементах питания, прежде всего в N, и количество минерального N в почве обеспечивает в большей степени потребности растений. Наличие данной зависимости показывает, что эффективность потребления питательных веществ растениями овса изменяется в зависимости от типа погоды.

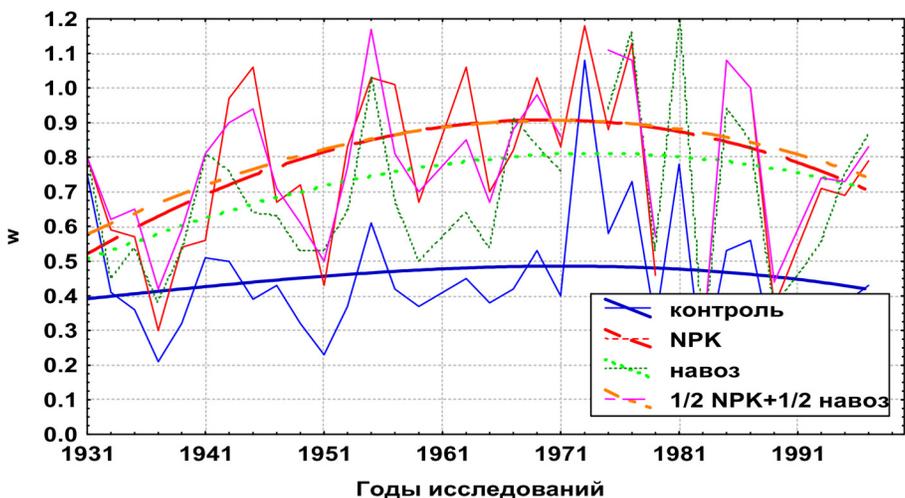


Рисунок 1 – Динамика реализации потенциала продуктивности овса в длительном полевом опыте ДАОС: ежегодные (тонкие линии) и сглаженные данные.

При естественном плодородии почвы (контрольный вариант) потенциал продуктивности реализуется в среднем на 40-50%, обнаруживая максимальные значения в 1961-1981 гг. Относительная средняя прибавка за счет оптимизации условий минерального питания растений может достигать 39% на варианте полного минерального удобрения и 1/2 дозы NPK и навоза. Для варианта с внесением навоза W увеличивается в среднем на 29%. Уже в первые годы после применения удобрений прирост относительной урожайности составляет 12-25%, достигая наибольших значений для органоминерального варианта. Влияние эквивалентных доз навоза остается на протяжении всего периода наблюдений менее эффективным в увеличении условий питания растений, в среднем на 10%, за исключением нескольких последних лет наблюдений. Реализация потенциала продуктивности овса при внесении минерального и

эквивалентной дозы органо-минерального удобрения практически одинакова.

Можно заметить, что достигнутый уровень окультуренности почвы в данном опыте не является постоянным, изменяясь во времени в результате антропогенного или климатического воздействия. Вероятными причинами снижения относительных прибавок урожая, более заметных на минеральном и органо-минеральном вариантах после 80-х гг., могут быть изменение погодных условий, влияющих на чередование благоприятных и неблагоприятных лет, а также изменение агротехники – например, несвоевременность выполнения технологических операций.

В первом опыте ЦОС ВНИИА при естественном плодородии почвы (контрольный вариант) потенциал реализации продуктивности вначале составлял 50%, снижение за 10 лет опыта составило около 10% (рис. 2). Он оставался на уровне 40% в 1975-90 гг.

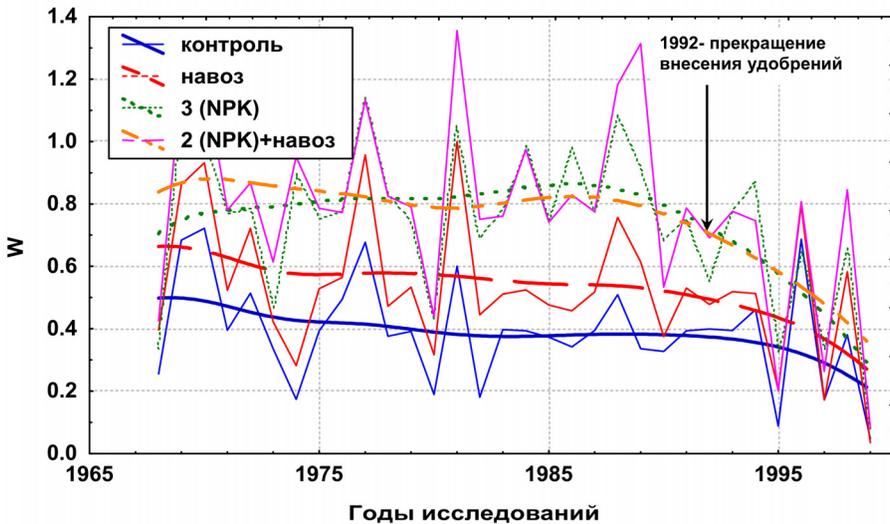


Рисунок 2 – Динамика реализации потенциала продуктивности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв»: ежегодные (тонкие линии) и сглаженные данные.

Динамика W для варианта Н сходна с контрольным вариантом, оставаясь в среднем больше на 15%, а после 1990 г. – 10%, как результат ускоренного снижения потенциала продуктивности по сравнению с контролем в конце описываемого периода. Потенциал продуктивности у варианта NPK превышал таковой для Н в среднем на 5%, но в последствии за 7 лет упал до уровня контрольного. Снижение потенциала продуктивности на варианте Н составило около 20%, последствие внесения навоза в 1993-96 гг. позволяло обеспечить бóльшую продуктивность по сравнению с вариантом с

внесением минеральных удобрений. Варианты 3NPK и N+2NPK оказались близкими в реализации потенциала продуктивности ячменя, составлявшего в 1975-90 гг. в среднем 80-85% от оптимального, при этом его возрастание для органо-минерального варианта происходило быстрее, чем на варианте 3NPK, для достижения которого потребовалось около 10 лет. После прекращения внесения удобрений снижение потенциала продуктивности составило 50% за 7 лет, происходя одинаково для обоих вариантов. Со снижением величины N-лимитированной урожайности W возрастает, корреляция значима при 95% для варианта N и N+2NPK (r отрицателен, составляя 0,43 и 0,38 по абсолютной величине, соответственно), возрастая при исключении периода 1967-1977 гг. до 0,69 и 0,62 по абсолютной величине, соответственно.

Второй опыт ЦОС ВНИИА интересен с той точки зрения, что он заложен в расчете на достижение максимально возможной продуктивности за счет последовательного наложения на фон органо-минерального питания комплекса средств защиты и роста растений. Органо-минеральный фон опыта позволил достичь через 12 лет потенциал продуктивности 90% от оптимального, впоследствии оставаясь на уровне 85-95% (рис. 3).

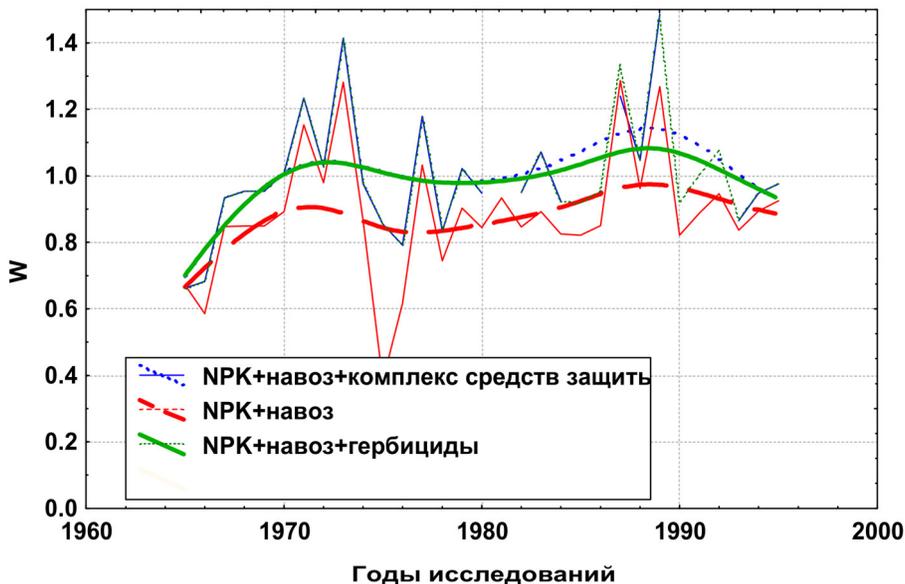


Рисунок 3 – Динамика реализации потенциала продуктивности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Эффективность удобрений при комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте»: ежегодные (тонкие линии) и сглаженные данные.

Внесение гербицидов на этом фоне позволило достичь в тот же период оптимальной продуктивности, в среднем в период 1970-

80 г. различия составляли 15%, впоследствии сократившись до 10-12%. Введение варианта с дополнительным наложением средств защиты растений проявлялось в лишь в отдельные годы, дополнительное повышение продуктивности составляло не более 6% (максимальные усредненные значения продуктивности достигли 115%), впоследствии снизившись до уровня варианта с гербицидами. Следовательно, исключение конкуренции за минеральное питание с сорняками позволило достичь устойчивого увеличения продуктивности, а использование на этом фоне дополнительных средств защиты давало нестабильный эффект. Последнее, впрочем, может быть связано с меньшим временным рядом по сравнению с двумя другими вариантами. Вариант с внесением органических и минеральных удобрений позволял обеспечить уровень продуктивности, превышающий на 5-10% аналогичный вариант первого опыта ЦОС, вероятно, за счет меньшей интенсивности севооборота, при этом сроки достижения продуктивности в обоих случаях оказывались равными.

Снижение потенциала реализации продуктивности ячменя после 1988 г., заметное для всех вариантов, не связано с модификациями опыта и, как в случае опыта ДАОС, может быть связано как с неблагоприятными условиями периода уборки, так и с несвоевременным выполнением технологических операций. Со снижением величины N -лимитированной урожайности W возрастает для варианта с внесением органических и минеральных удобрений, корреляция значима при 95% уровне значимости (r отрицателен, составляя по абсолютной величине 0,56), возрастая при исключении первых 12 лет до 0,71.

Более подробный анализ влияния изменения продуктивности культуры за время проведения полевого опыта возможен на основе метода EV -диаграмм для скользящих оценок средних (E) и дисперсий (V). Конечные и начальные точки диаграмм, а также отдельные точки, когда дисперсия достигала максимальных или минимальных значений, выделены цифрами, обозначающими номер члена временного сглаженного ряда (т.е. номер соответствующего периода, за который проведено сглаживание). Рост среднего уровня урожайности уменьшает риск получения низких урожаев, а увеличение дисперсии увеличивает его. Для графического представления варьирования урожайности на EV -диаграммах также построены прямые, каждая из которых задает области получения заданной урожайности с соответствующей вероятностью.

Рассмотрим динамику урожайности ячменя 5 вариантов первого опыта ЦОС (рис. 4). В период 1968-1989 г. (точки 1-13) для контрольного варианта происходило снижение, как уровня урожайности, так и снижение дисперсии, так что расстояние от точек диаграммы до прямой 80% обеспеченности урожайности 10 ц/га практически не изменялось (рис. 4а). Исключение составляет

период 1970-1982 гг. (точки 3-6), когда происходило падение урожайности с сохранением дисперсии, т.е. условия получения урожая ячменя ухудшались, затем урожайность вновь возросла. В 1980-1992 гг. (точки 13-16) условия обеспечения урожая 10 ц/га улучшились – точки располагаются между прямыми 80 и 90% обеспечения урожайности. В 1985-1999 гг. (точки 18-23) происходило увеличение стандартного отклонения – более чем в 2 раза при снижении урожайности – т.е. условия обеспечения урожайности 10 ц/га ухудшились и точки стали вновь удаляться от прямой 80% обеспеченности. В этом варианте без внесения удобрений ухудшение условий получения урожая может быть связано с повторением неблагоприятных погодных лет.

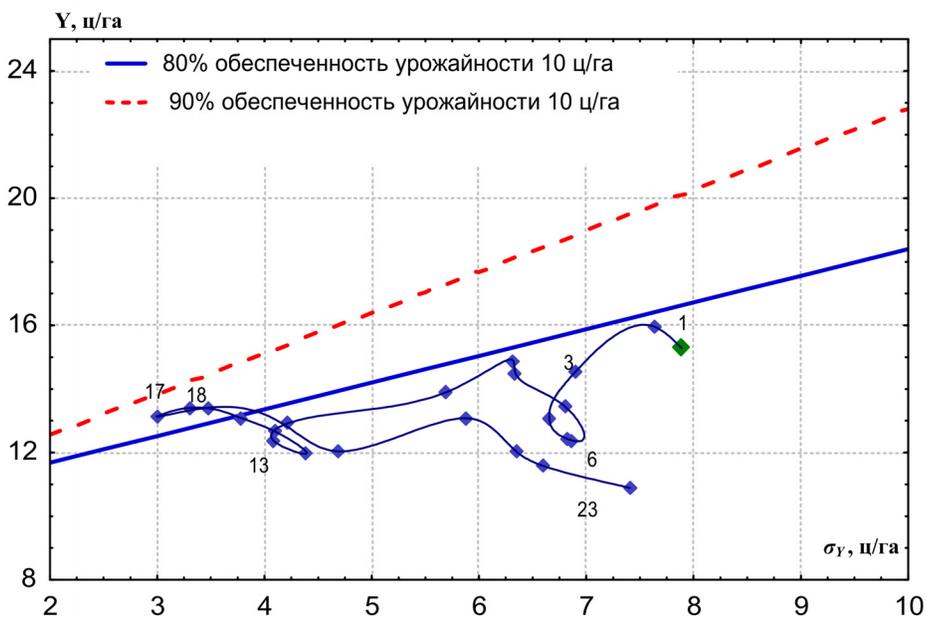


Рисунок 4 а – EV-диаграмма оценок средних величин и средних квадратичных отклонений урожайности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв» по 10-летним скользящим периодам в 1968-1999 гг. Вариант: а – абсолютный контроль. Прямые соответствуют 80 и 90% обеспеченности заданной урожайности, цифры на графиках обозначают соответствующий период, за который проведено сглаживание.

Применение тройной дозы NPK и эквивалентной ей дозы органоминеральных удобрений позволяет достичь устойчивой урожайности 20 ц/га – для минерального варианта достижение 80% вероятности потребовало периода 1968-82 гг., а на органоминеральном варианте достигалось практически сразу (рис. 4 б, в).

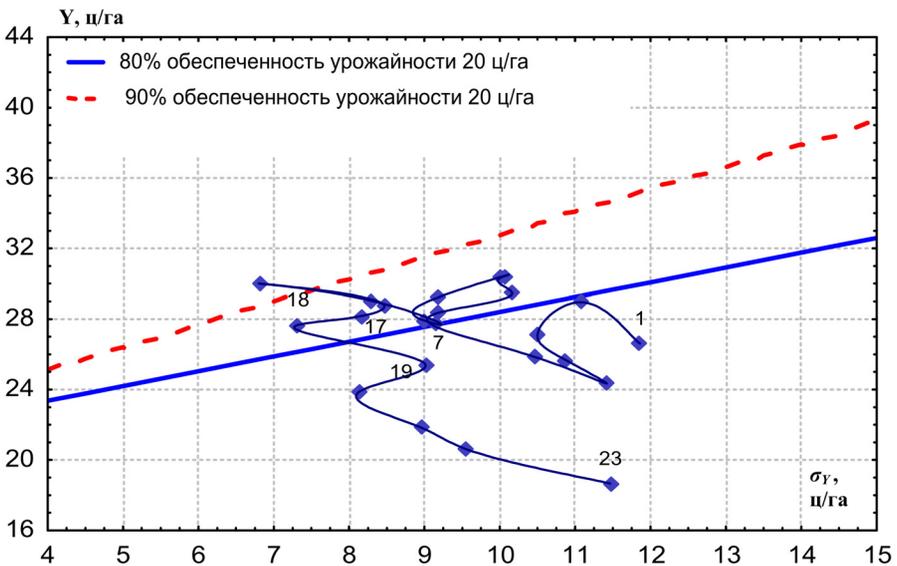
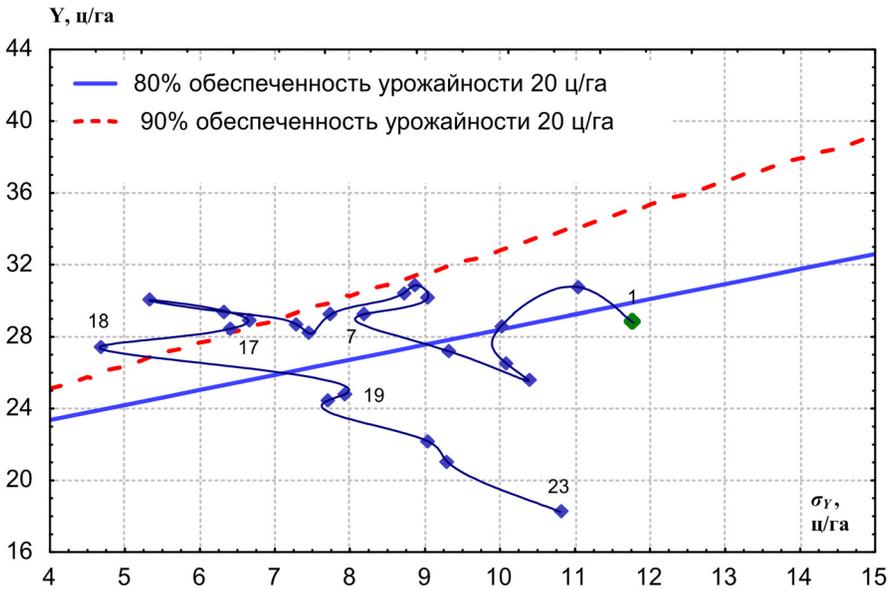


Рисунок 4 б, в – EV-диаграмма оценок средних величин и средних квадратичных отклонений урожайности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв» по 10-летним скользящим периодам в 1968-1999 гг. Варианты: б – Н+2НРК, в – НРК в дозе, эквивалентной содержанию в Н. Прямые соответствуют 80 и 90% обеспеченности заданной урожайности, цифры на графиках обозначают соответствующий период, за который проведено сглаживание.

Урожайность органо-минерального варианта оставалась в 1974-94 гг. (точки 7-18) на уровне 28-31 ц/га, но квадратичное отклонение снижалось последовательно практически вдвое, достигая минимума 4,7 ц/га, что позволило достичь и превысить вероятность 90% получения урожая 20 ц/га.

В этот же период урожайность минерального варианта также составляла 28-30 ц/га, при большей величине межгодовой изменчивости – минимальное значение в полтора раза превышает минимум органо-минерального варианта и, как следствие, достигалась не более чем 85%-ная вероятность урожая 20 ц/га, за исключением короткого периода 1985-94 гг. (точка 18). В 1986-99 гг. (точки 19-23) урожайность падает в обоих вариантах до уровня 18 ц/га при квадратическом отклонении 11 ц/га, что примерно соответствует 80%-ной обеспеченности урожайности 10 ц/га. Проведенный анализ дает возможность не только констатировать повышение дисперсии при увеличении урожайности, но и сравнивать влияние различных систем удобрения, оценивать риск получения низких урожаев и вероятность поддержания заданного уровня урожайности в отдельные отрезки времени проведения опыта. В частности, для всех вариантов данного опыта выявляется возможность обеспечения увеличения не только абсолютной величины, но и стабильности урожаев за счет внесения агрохимических средств, а также возрастание дисперсии при одновременном снижении урожайности после прекращения внесения удобрений.

Динамика урожайности и дисперсии ячменя, оцененная с помощью EV-диаграмм во втором опыте ЦОС ВНИИА показана на рис. 5. Органо-минеральная система позволяет достичь стабильной урожайности 20 ц/га – достижение уровня 90%-ной вероятности потребовало периода 1965-84 гг. (точки 1-11) (рис. 5б). В отдельные периоды достигалась 80%-ная обеспеченность урожайности 25 ц/га. В период 1976-95 гг. (точки 12-22) урожайность на органо-минеральном варианте составляла 32-34 ц/га, при среднеквадратичном отклонении 7,6-10,3 ц/га. В 1982-1991 гг. (точка 18) достигалась максимальная продуктивность при наименьшей величине дисперсии.

Такую же динамику продуктивности обнаружил и второй опыт ЦОС. Хотя органо-минеральный N+2NPK вариант первого опыта (рис. 4в) достигает на 3,5 ц/га меньшей продуктивности, в обоих случаях обеспечивается 80%-ное достижение вероятности 25 ц/га (для этого можно сравнить расположение соответствующей прямой на рис. 5а). Таким образом, в благоприятные климатические годы в обоих опытах органо-минеральные варианты двух опытов обеспечивали одинаковую стабильность урожаев ячменя, несмотря на различия в севооборотах. В 1983-1995 гг. (точки 19-22) органо-минеральный вариант первого опыта оказался менее устойчивым, следовательно, менее благоприятным.

Наложение на данный фон гербицидов обеспечило достижение 90%-ной вероятности урожая 25 ц/га к периоду 1973-82 гг. (точка 9) и впоследствии – выше, за исключением последних четырех периодов.

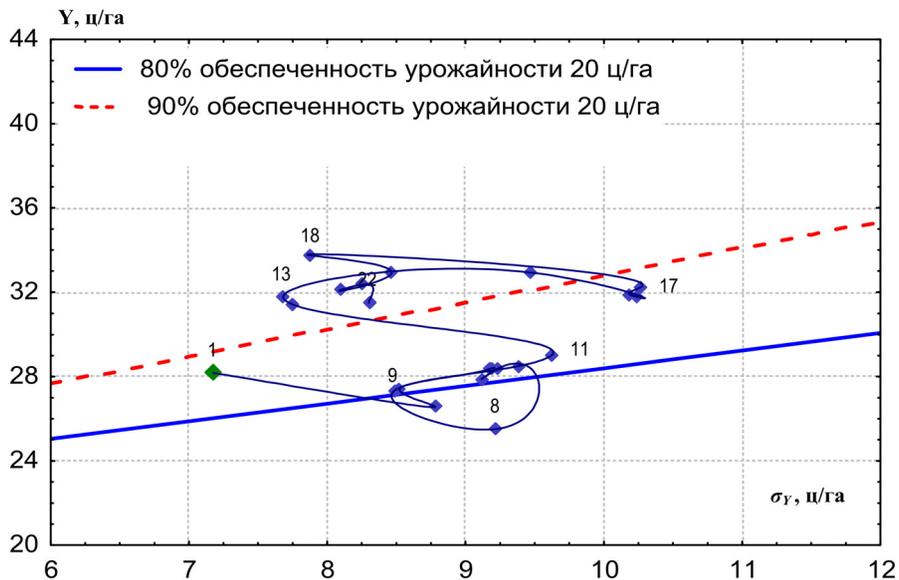
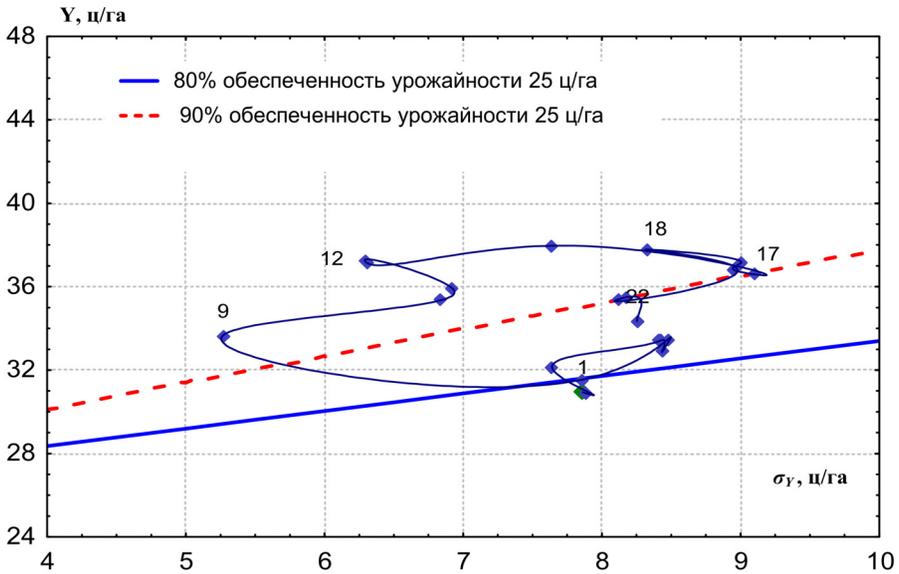


Рисунок 5 а, б – EV-диаграмма оценок средних величин и средних квадратичных отклонений урожайности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Эффективность удобрений при комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте» по 10-летним скользящим периодам. Варианты: а – органо-минеральный фон со средствами защиты; б – органо-минеральный фон.

Динамика урожайности и дисперсии в этом случае другая – до 1976-85 гг. (точка 12) обеспечивалось снижение риска при возрастании урожайности, но, при достижении уровня 37 ц/га и среднеквадратичном отклонении 6,3 ц/га, впоследствии происходило постоянное возрастание изменчивости – она увеличилась в 1,4 раза к периоду 1982-91 гг. (точка 18) при сохранении прежней урожайности, что увеличило риск снижения урожайности ниже 25 ц/га, особенно после 1983-95 гг. (точки 19-22). К концу исследуемого периода условия получения урожайности были близки к начальным, обнаружив отсутствие однонаправленного изменения под дополнительным воздействием средств защиты растений. Очевидно, что возрастание урожайности до уровня оптимального обеспечило участие новых факторов изменчивости урожайности, действие которых не проявлялось на органо-минеральном фоне.

EV-диаграммы также позволяют косвенно оценить сравнительное влияние элементов агротехнологии и агроклиматических условий на обеспечение устойчивости урожая. Для этого целесообразно сравнить направленность изменений на диаграммах реальных и полученных с помощью имитационной модели данных урожайности (рис. 6). В условиях оптимального минерального питания по данным модели в 1965-80 гг. (точки 1-7) обеспечивалась реализация 80%-ной вероятности урожайности 25 ц/га, поскольку с ростом урожайности в 1,5 раза возросла межгодичная изменчивость. Период 1973-90 гг. (точки 9-18) характеризовался варьированием между 80 и 90% вероятности урожайности, после которого вновь произошло снижение урожайности с одновременным снижением дисперсии. Если сравнить данные модели с вариантом N+NPK+гербициды второго опыта ЦОС, урожайность 25 ц/га в нем обеспечивалась в большинстве периодов на уровне вероятности 90% и выше, при меньшем, более чем в 1,5 раза, среднеквадратичном отклонении (рис. 5а). Колебания погодных условий в 1975-95 гг. (точки 11-22) выражались, главным образом, в изменении дисперсии при достаточно устойчивом сохранении уровня урожайности > 35 ц/га. Внесение комплекса агрохимических средств привело к улучшению условий получения стабильного урожая ячменя в данном варианте опыта за счет стабилизации как урожая, так и величины дисперсии – более чем вдвое по сравнению с вариантом модели.

Сравнение EV-диаграммы N-лимитированной урожайности (рис. 6а) с органо-минеральным вариантом второго опыта ЦОС (рис. 5б) показывает, что в обоих вариантах в 1973-91 гг. (точки 9-18) происходило практически однонаправленное снижение дисперсии при сохранении обеспеченности урожайности, модель предсказывает такую же динамику дисперсии в 1981-1997 гг. (точки 17-24). В вариантах опыта среднеквадратичное отклонение оставалось всегда выше предсказанного моделью.

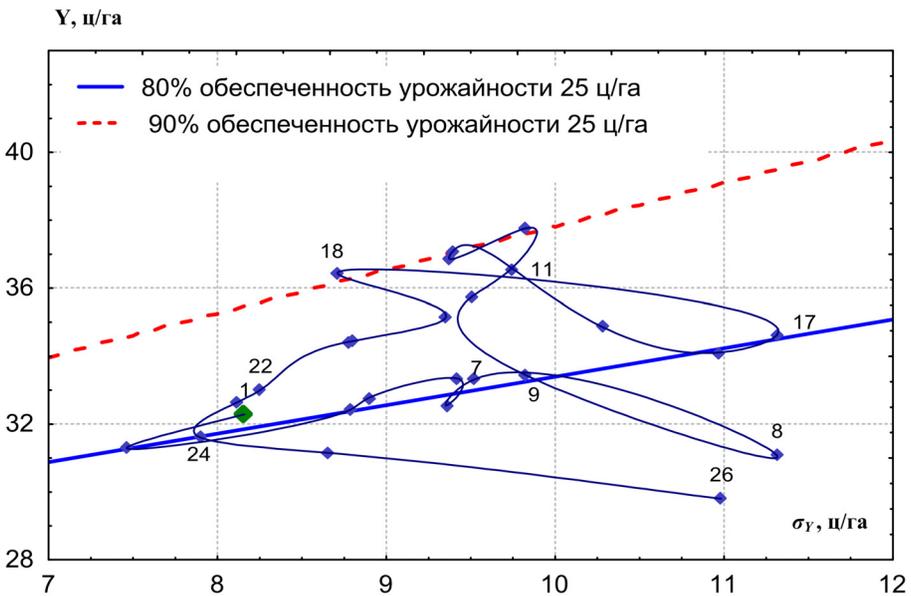
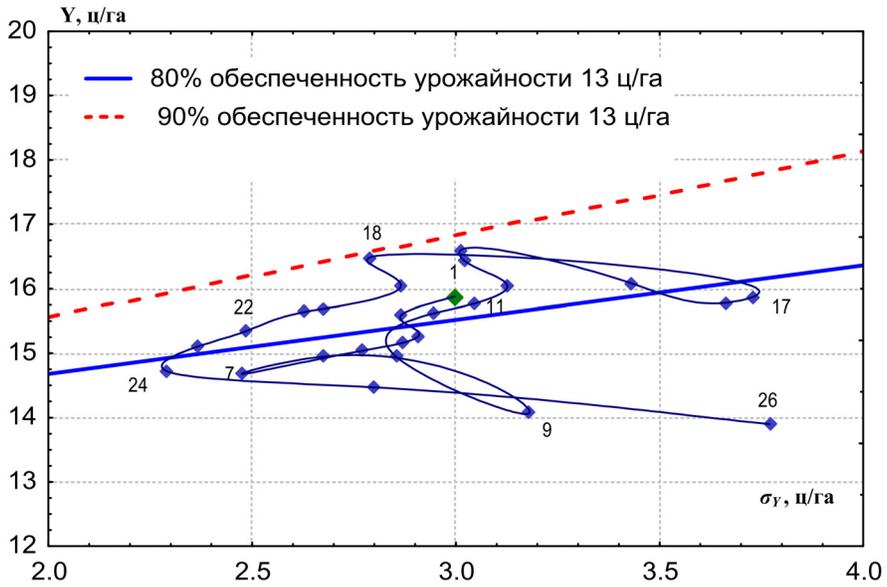


Рисунок 6 а, б – EV-диаграмма оценок средних величин и средних квадратичных отклонений урожайности ячменя, полученная с помощью модели «Почва – Климат – Урожай» в период 1965-1999 гг. по 10-летним скользящим периодам. Варианты: а – N-лимитированная урожайность; б – оптимальное N-питание.

Следовательно, внесение удобрений обеспечило при изначально высокой изменчивости урожайности возможность ее последовательного снижения, т.е. уменьшения риска низких урожаев,

хотя абсолютная величина межгодовой изменчивости оставалась выше рассчитанных для условий N-лимитирования. При прекращении внесения удобрений (после 1992 г., рис. 2; точки 19-23 рис. 4 б, в) данная тенденция сразу прекращалась, хотя климатические условия благоприятствовали, согласно модели, ее проявлению (тот же период на рис. 6). Это обстоятельство является свидетельством прямого действия минеральных и органических удобрений на изменение условий устойчивости урожая яровых зерновых культур.

Заключение

В условиях Нечерноземной зоны при естественном плодородии в течение длительного периода обеспечивается не более 40% потенциала продуктивности яровых зерновых культур. Динамика реализации потенциала продуктивности культуры обнаруживает эффект благоприятных и неблагоприятных климатических лет, а также прекращения внесения удобрений. Рост потенциала продуктивности составлял 15-30% при внесении удобрений и дополнительно около 10% при использовании средств защиты.

Диапазон варьирования урожайности яровых зерновых культур увеличивается при увеличении доз применяемых удобрений и при уровне минерального питания, отличного от оптимального. При значительном увеличении варьирования с ростом урожайности проявляется преимущество органо-минеральных систем удобрения в обеспечении устойчивости урожая, при слабом увеличении варьирования – минеральных систем при эквивалентных дозах внесения. Выявлено влияние увеличения не только абсолютной величины, но и стабильности урожаев за счет внесения агрохимических средств, как в прямом действии, так и в последствии. При росте обеспеченной урожайности возможно последовательное снижение среднеквадратичного отклонения более чем вдвое по сравнению с условиями питания, отличными от оптимальных.

В течение достаточно длительных периодов времени может происходить последовательное возрастание урожайности с увеличением дисперсии, либо обратный процесс – снижения урожайности и дисперсии (в обоих случаях – с сохранением вероятности получения заданного урожая). В определенные периоды возможно увеличение урожайности с одновременным снижением дисперсии – под воздействием улучшения условий питания растений за счет внесения агрохимических средств и реализации благоприятных погодных условий, но, как правило, данное изменение не стабильно. В неблагоприятные годы и при прекращении внесения удобрений урожайность снижается на фоне повышения дисперсии. При достижении оптимальной урожайности повышение урожаев возможно и за счет снижения межгодовой изменчивости, т.е. уменьшения риска низких урожаев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алиев А.М., Варламов В.А., Державин Л.М. и др. 2011. Эффективность удобрений при их комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте (опыт СШ 2/60). В сб.: Результаты длительных исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями Российской Федерации (К 70-летию Геосети). – М.: ВНИИА. с. 17-33.

Ефремов В.Ф. 2011. Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв. В сб.: Результаты длительных исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями Российской Федерации (К 70-летию Геосети). – М.: ВНИИА. с. 47-71.

Ранькова Э.Я. 1976. Объективная типизация метеорологических условий вегетационного периода озимых культур. В кн.: Агрометеорологические аспекты применения минеральных удобрений и агротехники. Труды Института экспериментальной метеорологии. – М.: Гидрометеиздат. Вып. 9 (68). с. 20-39.

Романенков В.А, Сиротенко О.Д., Рухович Д.И., Романенко И.А, Шевцова Л.К., Королева П.В. 2009. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. – М.: ВНИИА. 96 с.

Сиротенко О.Д. 1981. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем. – Л: Гидрометеиздат. 188 с.

Сиротенко О.Д. 2007. Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования. Методическое пособие. – М: Росгидромет. 77 с.

Сиротенко О.Д. 2004. Оценка влияния глобального изменения климата на агроклиматические ресурсы и климатообусловленную урожайность основных сельскохозяйственных культур. В кн.: Глобальные проявления техногенеза и изменения климата в агропромышленной сфере. – М.: РАСХН. с. 24-32.

Сиротенко О.Д., Абашина Е.В, Павлова В.Н., Попова Е.Н., Романенков В.А. 2008. Сельское хозяйство. В кн.: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 2. Последствия изменений климата. – М.: Росгидромет. с. 223-234.

Сиротенко О.Д., Абашина Е.В. 1982. Об использовании динамических моделей для оценки агрометеорологических условий формирования урожая. Метеорология и гидрология. № 8. с. 95-101.

Стребков И.М. 1989. Основные закономерности взаимодействия векторов почвенного плодородия, удобрений и погоды в условиях дерново-подзолистых почв Центрального района НЧЗ РСФСР. Агрехимия. № 2. с. 36-41.

Стребков И.М., Кирикой Я.Т., Халанская Т.П. 1988. Методическое руководство по использованию принципов системного анализа в агрохимических исследованиях закономерности действия удобрений. – М.: ВИУА. 72 с.

Сысуев В.А., Мухамадьяров В.Ф. 2001. Методы повышения агробиологической эффективности растениеводства. Киров: НИИСХ Северо-Востока. 216 с.

Фрид А.С. 2003. Методы сравнения вариантов в длительных полевых опытах. В сб.: Совершенствование методики проведения длительных опытов и математические методы обработки экспериментальных данных. – М.: Агроконсалт. с. 66-73.

Хлыстовский А.Д. 1992. Плодородие почвы при длительном применении удобрений и извести. – М.: Наука. 192 с.