

УДК 631.95

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЦЕНОЗОВ**д-р геогр. наук Г.И. САЧОК, канд. техн. наук Г.А. КАМЫШЕНКО****(Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси, Минск)**

Представлен метод территориального и временного оценивания вкладов природных и антропогенных факторов в формирование продуктивности агроценозов. Вклад исследуемых факторов в анализируемую переменную оценивается по коэффициенту детерминации, получаемому по последовательному учету значений парной, множественной и канонической корреляций, соответственно целям, задачам и методам оценивания, объему и структуре данных. Территориальные оценки получены по данным 2001 – 2003 годов на уровне административных районов, временные оценки – за период 1960 – 2003 годов на уровне административных областей. В обоих типах оценивания, временном и территориальном, решаются три задачи – оценки вкладов в формирование продуктивности агроценозов трех различных факторов, фактически взаимно независимых: климат, удобрения, почвы. Особенностью работы является не только большое разнообразие корреляционных схем, но и их причинное объяснение, многомерность исследуемых факторов. Последнее обстоятельство проявляется в обобщении разных схем анализа и усложнении интерпретации результатов. Практическая ценность разработки заключается в возможности учета полученных оценок при анализе эффективности использования земельных ресурсов и при разработке общей стратегии адаптации агроэкосистем к изменению климата и условий хозяйствования.

Введение. Анализ временных рядов агроклиматических показателей широко используется для прогнозирования формирующейся продуктивности сельскохозяйственных культур [1 – 7]. Разработка математико-статистических подходов анализа, обобщения и систематизации статистических данных для научных и практических выводов в условиях изменяющегося климата приобрела особую актуальность и значимость. Концепции территориальной (пространственной) и временной структур и их сопряжения для географических объектов введены в научные исследования в стране в работах [8, 9]. Там же впервые рассматривается проблема эквивалентности вертикального, горизонтального и временного масштабов колебаний гидрометеорологических элементов в исследуемом регионе.

Целью данного исследования является комплексная оценка вкладов климатологических, почвенных и антропогенных (хозяйственных) факторов в обеспечение современного уровня урожайности основных сельскохозяйственных культур в территориальном (по данным 2001 – 2003 гг., административные районы) и временном (по данным 1960 – 2003 гг., административные области) аспектах.

Материал и методы. В качестве меры связи между переменными использовались коэффициенты парной, множественной и канонической корреляции (R). Величина R^2 – коэффициент детерминации, объясняет долю изменчивости – зависимости переменной (предиктанта) от независимых переменных (предикторов) в долях единицы или процентах [10]. При получении территориальной оценки комплексов факторов использованы данные по административным районам (длина ряда $n = 118$): картограмма урожайности пяти культур (озимой ржи, ячменя, овса, картофеля, кукурузы); характеристика почв (показатели кадастровой оценки пахотных земель, интенсивность их использования). Климатические факторы представлены температурой воздуха и атмосферными осадками (май – август). Оценка уровня технологии получена посредством анализа данных корреляции карт урожайности и внесения под культуры органических и минеральных удобрений. Эти три обобщенных показателя многовариантной, многоаспектной и многофакторной корреляции и детерминации являются почти «полной», так как их сумма близка к 100 %.

Отметим, что каждый из корреляционных методов специфичен, имеет свои недостатки и преимущества, отличается уровнем агрегирования и обобщения данных. Анализ и интерпретация этих результатов базируются на использовании коэффициента детерминации R^2 , его аддитивных свойствах, что важно при сопоставлении результатов и обобщении их значений путем сложения.

Временная оценка детерминации урожайности различными комплексами факторов основана на временных рядах показателей за 1960 – 2003 годы (длина ряда $n = 44$). В отдельных случаях использовались также и укороченные ряды. Оценка комплексных факторов во временном аспекте по аналогии с территориальным реализована по трем блокам/направлениям: почва (баллы бонитета, плодородия и интенсивности использования пахотных почв); климат (температура воздуха и атмосферные осадки); технологический показатель (удобрения, минеральные и органические). В каждой ситуации значения R и R^2 существенно отличаются в зависимости от примененного метода анализа и уровня осреднения исходных данных.

Результаты и их обсуждение. В исследованиях такого уровня в качестве интегральных факторов формирования урожайности рассматриваются ландшафтные условия (рельеф, почва, климат), уровень технологии (семеноводство, ассортимент возделываемых сельскохозяйственных культур, технология обработки почвы, минеральные и органические удобрения, мелиоранты почв, средства и технологии защиты растений), а также собственно «человеческий фактор» (планирование, управление и физическая реализация планов и технологических задач).

В представленном исследовании методами парной, множественной и канонической корреляций оцениваются три группы факторов, важнейших в формировании урожайности: показатели качества почвенных условий (три шкалы качества почв в баллах); климатические факторы (температура воздуха и атмосферные осадки); уровень земледелия (количество внесенных минеральных и органических удобрений). Это в высокой степени агрегированная схема анализа данных, использованная в целях тестирования генерализованных факторов.

Для оценки вклада качества почв в изменчивость урожайности пяти культур использованы показатели кадастровой оценки земель [11 – 13]. Это группа в высокой степени взаимно коррелированных показателей. Коэффициенты парной корреляции этих показателей с урожайностью сельскохозяйственных культур по каждому из трех лет находятся в диапазоне 0,41...0,69. Соответственно, коэффициенты детерминации изменяются от 0,17 до 0,48. Осреднение по строкам и столбцам корреляционной матрицы по пяти культурам и 3-м годам урожайности с показателями качества земель дает значение коэффициента детерминации, равное 0,33, т.е. качество почв обеспечивает 33 % урожайности. Методом множественной корреляции здесь получены значения $R^2 = 0,35$ и $R^2 = 0,38$, а определенное методом канонической корреляции среднее арифметическое по двум первым значениям по 3-м годам составляет $R^2 = 0,34$, что практически совпадает с оценкой по методу парной корреляции. Таким образом, по результатам применения 3-х методов нами принята средняя оценка вклада «почвенного» фактора в вариабельность урожайности, составляющая 35 % (вклад почв $R^2 = 35$ %).

Оценка вклада климатических факторов в изменчивость урожайности тех же пяти культур по коэффициентам парной корреляции, выполненная раздельно по температурам и осадкам 4-х теплых месяцев и осредненная по 3-м годам, составила 14 % + 11 % = 25 %. Средняя оценка для года R^2 составила примерно 8,3 %. Оценки по температуре воздуха и атмосферным осадкам по 3-м годам и двум сезонам (весна, лето) составили пары значений: 7 и 25 % (2001 г.); 11 и 7 % (2002 г.); 4 и 4 % (2003 г.) или 32, 18 и 8 %, что составляет в среднем 19 % за год. Таким образом, оценка детерминации (R^2) урожайности по месячным данным вдвое ниже, чем полученная по сезонам. Их среднее значение находится в интервале 8,3...19 %. Методом множественной корреляции по данным двух сезонов 3-х лет детерминация урожайности температурой составила по годам: 0,23; 0,15 и 0,10 (среднее значение равно 0,16); осадками – 0,26; 0,06 и 0,05 (среднее значение равно 0,12). Поскольку температура и осадки слабо коррелированы между собой, определяем суммарное значение детерминации двумя факторами показателем $R^2 = 0,28$ (28 %). Значение, полученное по данным 3-х лет методом канонической корреляции как среднее двух первых коэффициентов корреляции R_{cp}^2 , также равно 0,28. Это наиболее вероятное значение вклада в территориальную вариацию урожайности сельскохозяйственных культур климатического фактора.

Связь урожайности основных возделываемых в стране сельскохозяйственных культур (озимой ржи, ячменя, овса, картофеля и кукурузы на силос) с внесением удобрений – минеральных и органических – также оценена разными методами. При исследовании по методу парной корреляции сопоставлялись ряды данных по урожайности каждой из рассматриваемых культур и ряды, характеризующие внесенные под эти культуры минеральные и органические удобрения, по 118 административным районам по трем годам (2001 – 2003 гг.). Получены две оценки, характеризующие вклад в изменчивость урожайности сельскохозяйственных культур внесенными удобрениями: минеральными – $R^2 = 0,25$ (25 %), органическими – $R^2 = 0,05$ (5 %). Суммарное значение детерминации этих двух слабо взаимосвязанных факторов составляет по методу парной корреляции 0,30 (30 %). Соответственно по разным культурам и внесенным удобрениям двух категорий по методу множественной корреляции, получаем следующие средние значения коэффициента детерминации для культур: рожь – 0,20; ячмень – 0,35; овес – 0,24; картофель – 0,25; кукуруза – 0,42. Полученные коэффициенты множественной корреляции по культурам дают среднее значение $R^2 = 0,29$. По методу канонической корреляции исследованы по 3-м годам 10 вариантов (внесение минеральных и органических удобрений под 5 культур) и 5 рядов урожайности сельскохозяйственных культур, получены следующие по годам оценки R^2 : 0,25; 0,35 и 0,26, среднее значение $R_{cp}^2 = 0,29$. Максимально генерализованная модель выполненного исследования состоит в совместном анализе данных за 3 года (2001 – 2003 гг.) по административным районам по схеме: минеральные удобрения, внесенные под зерновые культуры (озимую рожь, ячмень, овес) и картофель, органические удобрения, внесенные под те же три зерновые культуры и картофель. Получено наиболее агрегированное и обоснованное значение $R^2 = 0,37$ (37 %), являющееся в то же время нижним из текущих средних значений коэффициентов детерминации, что позволяет принять его в качестве эталонной оценки детерминированности урожайности сельскохозяйственных культур вносимыми удобрениями.

Полученные результаты позволили определить составляющие территориальной оценки факторов варьирования урожайности в процентах: почва – 35 %, климат – 28 %, удобрения – 37 %. Система оценок рассматривается как полная, квазизамкнутая. Так как в сумме частные оценки составляют 99 %, то можно сделать вывод, что процедура отсева шумов в этих комплексах статистически неоднородных и коррелированных данных выбрана и выполнена корректно.

Временная оценка осуществлена по идентичным трем крупным комплексам показателей, формирующих урожайность рассматриваемого перечня сельскохозяйственных культур. Здесь наиболее обеспе-

чен информацией фактор внесения удобрений. Методом парной корреляции по двум группам культур (зерновые и картофель) получены оценки детерминации урожайности органическими и минеральными удобрениями по административным областям и стране в целом. Обобщенный результат оценки – по стране в целом коэффициент детерминации $R^2 = 0,41$ (41 %), причем на органические удобрения приходится 13 %, на минеральные – 28 %. Более детальная картина получена на уровне отдельных культур методами парной и множественной корреляций по пяти сельскохозяйственным культурам для административных областей и республики в целом. Значения коэффициентов парной корреляции варьируют в широком диапазоне – от 0,04 до 0,74. При этом корреляционные зависимости урожайности от органических удобрений (локальное внесение) существенно ниже, чем от минеральных. Региональная оценка коэффициента детерминации (по всем культурам), полученная методом парной корреляции, следующая: с органическими удобрениями – 12 %, минеральными – 29 %; методом множественной корреляции: с органическими и минеральными удобрениями – 28 %. По этим же данным методом канонической корреляции получены осредненные коэффициенты детерминации: третий – $R_{ср.3}^2 = 0,45$; четвертый $R_{ср.4}^2 = 0,34$. Аналогичные оценки по первой главной компоненте (ГК) урожайности культур и ГК удобрений методом компонентного анализа – 49 и 37 %.

Таким образом, средние коэффициенты детерминации урожайности сельскохозяйственных культур минеральными и органическими удобрениями из множества вариантов определяют ступенчатую интервальную оценку. Поскольку полученные оценки детерминации разбросаны по шкале, в качестве обобщающей выбираем среднее арифметическое или медианное значение. Получаем оценку, равную 39 %, т.е. изменчивость урожайности сельскохозяйственных культур на 39 % обеспечивается применением удобрений – минеральных и органических.

Исследование вклада климатического фактора в формирование урожайности проведено на основе годовых, сезонных и месячных значений климатических показателей температур воздуха и атмосферных осадков. По годовым данным коэффициенты парной корреляции температуры воздуха и урожайности находятся в пределах 0,06...0,29 и ниже, с осадками значения еще меньше. Средние значения коэффициента детерминации R^2 составляют: по температуре воздуха – 14 %; по атмосферным осадкам – 3,8 %, что в сумме дает 17,8 %. По методу канонической корреляции получено обобщенное среднее значение $R_{ср.}^2 = 0,24$, или 24 %. Средние оценки корреляции по температурам воздуха и атмосферным осадкам весны и лета с урожайностью сельскохозяйственных культур составляют: «температура воздуха – урожайность» – 0,34; «атмосферные осадки – урожайность» – 0,22; «температура воздуха и осадки – урожайность» (множественная корреляция) – 0,48. По данным по административным областям средние значения коэффициентов детерминации для весеннего и летнего сезонов следующие: по методу парной корреляции: «температура воздуха – урожайность» – 0,04; 0,03 (весна, лето), «атмосферные осадки – урожайность» – 0,05; 0,01 (весна, лето); по методу множественной корреляции: «температура воздуха (весна, лето) – урожайность» – 0,12; «атмосферные осадки (весна, лето) – урожайность» – 0,05; «температура воздуха и атмосферные осадки (весна, лето) – урожайность» – 0,23. Обобщая результаты расчетов, получаем итоговые значения: по методу парной корреляции: «температура воздуха – урожайность» – $R^2 = 7$ %, «атмосферные осадки – урожайность» – $R^2 = 6$ %, суммарное значение – $R^2 = 13$ %; по методу множественной корреляции «климатические факторы – урожайность» $R^2 = 0,23$ (23 %); по методу канонической корреляции: средние значения по областям: $R_1^2 = 0,36$; $R_2^2 = 0,16$; средние значения по сезонам (весна, лето) по стране в целом – $R_1^2 = 0,35$ и $R_2^2 = 0,14$, т.е. на 0,01...0,02 ниже, чем предыдущие.

Ряд приведенных значений коэффициента детерминации отражает в целом иерархию методов оценивания – от парных корреляций к множественным и далее – к каноническим. Полученные оценки могут быть интерпретированы как иллюстрация увеличения роли системной организации объекта исследования, а также диалектических свойств методов расчетов и их результатов.

Поскольку полученные разными методами коэффициенты детерминации урожайности климатическим фактором не высоки, оценка по среднегодовым температурам и суммарным атмосферным осадкам явно занижена, поэтому обобщенная оценка должна быть выше указанной ранее 0,24. Равноценная ей оценка, полученная методом канонической корреляции между урожайностью основных сельскохозяйственных культур и сезонными (весна, лето) температурами воздуха и атмосферными осадками, является осредненным коэффициентом второй канонической корреляции. Следовательно, наиболее обоснованной оценкой вклада климатического фактора в изменчивость урожайности сельскохозяйственных культур должна быть принята величина, средняя по областям 0,36, или 36 %.

В схеме временной оценки вклада почвенного фактора в изменчивость урожайности основных возделываемых в стране сельскохозяйственных культур отсутствуют показатели, которые описывали бы временные тренды качества почв. В этой роли могли бы быть использованы региональные тренды содержания гумуса в почве. Также следовало бы определить цену прироста урожая на каждую единицу увеличения содержания гумуса. Вся эта информация для страны в целом позволила бы реализовать задачу оценивания, но такой информационной основы для ее решения в настоящее время практически нет.

В нашем исследовании это значение получено, как оценка сверху, как дополнение до 100 % двух рассмотренных выше показателей: $100 - 36 - 39 = 25$ %. Вклад изменения плодородия почв в изменчивость урожайности основных сельскохозяйственных культур составляет не более 25 %.

Заключение. Впервые как самостоятельное направление исследования вводится концепция и предлагаются методы территориального и временного оценивания вкладов трех компонентов природных и антропогенных факторов в формирование урожайности сельскохозяйственных культур. Эти интегрированные факторы варьируют в весьма широких интервалах и определяются как квазизамкнутая система «почва – климат – удобрения». Соотношения этих показателей в определении вариабельности данных по урожайности в территориальной (период 2001 – 2003 гг.) и временной (период 1960 – 2003 гг.) схемах расчетов составляют соответственно 35 : 28 : 37 (сумма 100 %) и 25 : 36 : 39 (сумма 100 %).

Сопоставление результатов двух схем оценки соотношения вкладов трех обобщенных факторов – почвенных условий, климатической изменчивости и количества внесенных минеральных и органических удобрений позволяет сделать ряд выводов: внесение органических и минеральных удобрений является основным фактором, обеспечивающим высокий фон урожайности (37 и 39 %), и в территориальном аспекте его роль, вероятно, чуть меньше, чем в схеме хронологического анализа; почвенный фактор играет важную роль в формировании территориальной неоднородности урожайности (35 %) и слабее проявляется во временной схеме анализа вариации урожайности (25 %); климатический фактор слабее проявляется в территориальной схеме анализа (28 %) и его роль более существенна в рядах урожайности комплекса культур во временной схеме анализа данных (36 %).

Таким образом, средние значения оценок по двум схемам составляют 30 : 32 : 38 (сумма 100 %), т.е. три комплексных фактора фактически исчерпывают (объясняют) вариацию данных об урожайности комплекса культур за 44 года (временная оценка) и по административным районам за 3 года (территориальная оценка). Тем самым получены две независимые (по данным) оценки соотношения факторов урожайности (почва : климат : удобрения) – территориальная (35 : 28 : 37) и временная (25 : 36 : 39). Имеет право использования и средняя из двух оценок (30 : 32 : 38), позволяющая рассматривать два первых фактора урожайности как равнозначные, несколько уступающие по значимости третьему – внесению удобрений. Именно фактор внесения удобрений (технологический) является ключевым в формировании урожайности. Тем не менее вполне обоснованы и реализуемы технологии, основанные на повышении эффективности использования почвенного и климатического комплексов.

Представленный в статье метод апробирован при выполнении научно-исследовательских работ по заданию Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «Природопользование». Полученные результаты исследований будут использованы при разработке Государственной климатической программы по заданию ГНТП «Экологическая безопасность».

ЛИТЕРАТУРА

1. Булавин, Л.А. Агроэкологические аспекты адаптивной интенсификации земледелия / Л.А. Булавин; под ред. В.П. Самсонова. – Минск: БИТ «Хата», 1999. – 244 с.
2. Математические методы оценки климатических ресурсов / В.А. Жуков [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 206 с.
3. Продуктивность сельскохозяйственных культур в зависимости от погодных условий и применения удобрений / В.В. Лапа [и др.] // Научные и прикладные аспекты изменений климата и использования климатических ресурсов. – Минск, 2000. – С. 130 – 131.
4. Изменения климата Беларуси и их последствия / В.Ф. Логинов [и др.]. – Минск: ОДО «Тонпик», 2003. – 330 с.
5. Сиротенко, О.Д. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв / О.Д. Сиротенко, Е.В. Абашина, В.Н. Павлова // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 4. – С. 107 – 114.
6. Уланова, Е.С. Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии / Е.С. Уланова, В.Н. Забелин. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 207 с.
7. Юзбашев, М.М. Статистический анализ тенденций и колеблемости / М.М. Юзбашев, А.И. Манелля. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 207 с.
8. Сачок, Г.И. Пространственно-временная структура гидрометеорологического режима Беларуси и прилегающих территорий / Г.И. Сачок. – Минск: Наука и техника, 1980. – 222 с.
9. Сачок, Г.И. Сопряженность колебаний климата в Северном полушарии / Г.И. Сачок. – Минск: Наука и техника, 1985. – 108 с.
10. Сачок, Г.И. Факторы и модели изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур Беларуси / Г.И. Сачок, Г.А. Камышенко; под ред. В.Ф. Логинова. – Минск: Бел. наука, 2006. – 243 с.
11. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных угодий Республики Беларусь: VIII тур. / под ред. И.М. Богдевича. – Минск: БИТ «Хата», 2002. – 507 с.
12. Динамика плодородия пахотных почв Беларуси / И.М. Богдевич [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2005. – № 1 (34). – С. 167 – 173.
13. Нацыянальны атлас Беларусі. – Минск: РУП «Белкартаграфія», 2002. – 292 с.

Поступила 27.08.2007