Зависимость продуктивности севооборота от применения фосфогипса и удобрений

Игорь Васильевич Синявский¹, Алексей Михайлович Плотников², Андрей Викторович Созинов², Наталья Дмитриевна Гущенская²

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинская область, г. Троицк, Россия

²Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева, Курганская область, Кетовский район, село Лесниково, Россия

e-mail: statistika429@mail.ru

Аннотация. Проведена оценка влияния возрастающих доз удобрений на валовый сбор зерна в зернопаровом севообороте в условиях лесостепного Зауралья. Цель проведенных исследований – определить оптимальные нормы удобрений для увеличения урожайности зерновых культур в условиях лесостепного Зауралья под влиянием фосфогипса и минеральных удобрений, провести корреляционно-регрессионный анализ результатов исследований, на основе которого построить математические модели, описывающие характер воздействия изучаемых факторов на урожайность сельскохозяйственных культур. Объект исследований – зерновые культуры. При естественном плодородии чернозёма продуктивность севооборота составила за три года 5,36 т/га, ежегодное внесение аммиачной селитры в дозах N40 и N80 обусловило превышение над контролем 20,5 и 20,9 % соответственно. Использование фосфорного удобрения способствовало повышению продуктивности севооборота на 11,4 %. Для получения наибольшей продуктивности (7,19 т/га) оптимальная норма удобрения отмечена на варианте с внесением N40P40 по фону 1 т/га фосфогипса, что составляет 2,40 т/га ежегодно. Выявлено, что применение азотного удобрения оказало наибольшее влияние на зерновые культуры. Оценка зависимости суммарного валового сбора в севообороте от трех изучаемых факторов показала наличие средней линейной связи между дозами фосфогипса, суперфосфата и продуктивностью и сильной связи – между дозами аммиачной селитры и продуктивностью. Более тесная связь была выявлена при оценке нелинейной зависимости между дозами фосфогипса, азота и продуктивностью севооборота. В результате построены уравнения нелинейной множественной регрессии, описывающие изучаемые зависимости, коэффициент аппроксимации которых составил 0,91–0,97.

Ключевые слова: фосфогипс; удобрения; урожайность; зерновые культуры; севооборот; корреляция; регрессия.

Для цитирования: Синявский И. В., Плотников А. М., Созинов А. В., Гущенская Н.Д. Зависимость продуктивности севооборота от применения фосфогипса и удобрений // Аграрный научный журнал. 2022. № 1. С.37–42. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i1pp37-42>.

AGRONOMY

Original article

Dependence of crop rotation efficiency on phosphogypse and fertilizers application

Igor V. Sinyavsky¹, Alexey M. Plotnikov², Andrey V. Sosinov², Natalya D. Gushchenskaya²

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Ural State Agrarian University», Chelyabinsk region, Troitsk, Russia

²Kurgan State Agricultural Academy by T.S. Maltsev, Lesnikovo village, Ketovsky district, Kurgan region, Russia

e-mail: statistika429@mail.ru

Abstract. An assessment of the influence of increasing doses of fertilizers on the gross grain harvest in grain-fallow crop rotation in the conditions of the forest-steppe zone of Trans-Urals was carried out. The purpose of the research is to determine the optimal fertilizer rates to increase the yield of grain crops in the conditions of the forest-steppe zone of Trans-Urals under the influence of phosphogyp-sum and mineral fertilizers, to conduct a correlation-regression analysis of the research results, on the basis of which to build mathematical models that describe the nature of the impact of the studied factors on productivity crops. The object of research is grain crops. With the natural fertility of the chernozem, the productivity of the crop rotation for three years was 5.36 t/ha, the annual application of ammonium nitrate in doses of N40 and N80 led to an excess over the control of 20.5 and 20.9%, respectively. The application of phosphate fertilizer increased crop rotation productivity by 11.4%. To obtain the highest productivity (7.19 t/ha), the optimal fertilizer rate was noted in the variant with the application of N40P40 against the background of 1 t/ha of phosphogypsum, which is 2.40 t/ha annually. It was revealed that the application of nitrogen fertilizer had the greatest impact on crops. An assessment of the dependence of the total gross harvest in the crop rotation on the three studied factors showed the presence of an average linear relationship between the doses of phosphogypsum, superphosphate and productivity and a strong relationship between the doses of ammonium nitrate and productivity. A closer relationship was revealed when assessing the non-linear relationship between the doses of phosphogypsum, nitrogen and crop rotation productivity. As a result, non-linear multiple regression equations were constructed that describe the dependences under study, the approximation coefficient of which was 0.91–0.97.

Keywords: grass mixture; green mass; crude protein; metabolic energy; sugar; nutrients; nitrogen; fat; fiber.

For citation: Sinyavsky I. V., Plotnikov A. M., Sosinov A. V., Gushchenskaya N. D. DEpendence of crop rotation efficiency on phosphogypse and fertilizers application. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(1):37–42. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i1pp37-42>.

Введение. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что длительное возделывание сельскохозяйственных культур вызывает снижение уровня плодородия почв в результате уменьшения запасов элементов минерального питания и ухудшения физико-химических свойств. Так как хозяйственный баланс элементов питания и энергии в агроценозах складывается отрицательно остановить этот процесс невозможно без применения минеральных удобрений и химических мелиорантов [1–3, 6, 11, 14, 16].

Для успешного совершенствования системы земледелия необходимо разработать общую систему управления антропогенным почвообразовательным процессом. При этом эффективность минеральных удобрений значительно возрастает, тогда, когда они применяются в строгом соответствии с агрохимическими свойствами почвы и потребностью растений. Несбалансированное применение промышленных туков приводит к снижению окупаемости и потере элементов питания, к нарушению баланса органического вещества в системе почва – агроценоз. Особое значение это имеет в Зауралье, так как уровень изученности вопросов почвенного плодородия и питания растений крайне низок [11, 12].

Одной из задач проведения научных исследований в области определения оптимальных градаций факторов, воздействующих на урожайность культурных растений является выявление существующих зависимостей, которые можно выразить в виде сравнительно простых регрессионных уравнений.

Поскольку на продуктивность сельскохозяйственных культур влияет большое число биотических и абиотических факторов, существует необходимость формирования базы данных, включающей результаты множества научных исследований и позволяющей построить разнообразные математические модели – линейные, нелинейные, парные, множественные, а также применять другие подходы (искусственный интеллект, нейронные сети), позволяющие выявить и понять зависимости, действующие в агроценозе [4, 7–10, 15, 19].

Разработанные математические модели, наиболее точно описывающие реакцию растений на применяемые агротехнические приемы, дают возможность прогнозировать, со сравнительно высокой вероятностью, величину урожая при тех сочетаниях факторов и их градаций, которые интересуют сельхозтоваропроизводителей.

Ранее проводимые исследования в лесостепи Зауралья не позволяют в полной мере изучить зависимость получаемого урожая от применяемых удобрений и мелиорантов.

Работы по исследованию зависимости урожайности зерновых культур с использованием метода математического моделирования в современных условиях являются актуальными.

Важной задачей в системах удобрения является выявление темпов изменения эффективности основных видов минеральных удобрений по мере увеличения длительности их применения. В условиях интенсивной химизации земледелия эти вопросы также приобрели особую актуальность.

Цель проведенных исследований – определить оптимальную норму удобрений для увеличения урожайности зерновых культур в условиях лесостепного Зауралья под влиянием фосфогипса и минеральных удобрений, провести корреляционно-регрессионный анализ результатов исследований, на основе которого построить математические модели, описывающие характер воздействия изучаемых факторов на урожайность сельскохозяйственных культур.

Методика исследований. В 2012–2014 гг. на опытном поле Курганской ГСХА проводили исследования в стационарном опыте по изучению эффективности отхода промышленного производства (фосфогипса) в отдельности и в различных сочетаниях с минеральными удобрениями в посевах зерновых культур.

Почва участка под опытом – чернозем выщелоченный слабогумусированный маломощный легкосуглинистый, характеризуется следующими показателями: содержание гумуса – 3,42 %, ЕКО – 23,4 мг-экв./100 г почвы. Реакция солевой вытяжки ($pH_{\text{КС}}$) слабокислая (5,70 ед.). Обеспеченность чернозема по методу Чирикова подвижными P_2O_5 – 39–41 мг/кг почвы, K_2O – 120–135 мг/га почвы, подвижной серой в пахотном слое 4,3 мг/кг

Размещение вариантов в опыте рендомизированное, повторность четырехкратная. Площадь делянки в опыте 30 м², учетная 24 м² (2×12). Фосфогипс и суперфосфат (при ежегодных дозах Р40 (Р120 соответственно) вносили один раз за ротацию под первую пшеницу 4-хпольного зернопарового севооборота разбросным способом с последующей заделкой предпосевной культивацией на глубину 10–12 см. Схема опыта состоит из трех блоков с различными фонами – нормами фосфогипса (без фосфогипса; 0,5; 1,0 т/га). На каждом фоне по шесть вариантов с дозами и сочетаниями азотных (аммиачная селитра (34,6 % д.в.) в дозах N40 и N80) и фосфорного (суперфосфат двойной (46 % д.в.). Учет и уборку проводили комбайном для мелкоделяночных опытов марки «TERRION» с шириной захвата жатки 2,0 м. В опыте использовался фосфогипс предприятия АО «Мелеузовские минеральные удобрения» (Республика Башкортостан) (массовая доля основного вещества, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, в пересчете на сухой дигидрат составляет 77 %).

В опыте выращивали пшеницу (*Triticum aestivum* L.), сорт Жигулевская, и ячмень (*Hordeum vulgare* L.), сорт Прерия. Технология возделывания зерновых культур и используемые дозы удобрений соответствовали рекомендованным для нашей зоны.

Статистическая обработка результатов заключалась в обработке методами дисперсионного анализа данных многофакторного опыта и линейной корреляции по Б.А. Доспехову [5]. Линейный и нелинейный множественный регрессионный анализ проведен при помощи программы Statistica 12.

Результаты исследований. Сложившиеся погодные условия вегетационного периода 2012 г. можно считать неблагоприятными для культур из-за высоких температур и недостаточного количества осадков. Среднемесячная температура воздуха за вегетационный период была выше среднеемноголетних данных на 2,4 °С, а количество осадков ниже – 87 мм (45,1 % от нормы). Гидротермический коэффициент за вегетационный период составил 0,30 единицы. В 2013 и 2014 гг. погодные условия были близки к средним многолетним данным. Среднемесячная температура вегетационного периода составила 16,7–17,0 °С при среднеемноголетних данных – 16,6 °С. Количество осадков составило соответственно по годам 169,5 и 237,2 мм, а гидротермический коэффициент – 0,66–0,92 ед.

В целом, при естественном плодородии чернозема и сложившихся погодных условий валовый сбор зерна с севооборота составил 5,36 т/га зерновых единиц, или 1,79 т/га ежегодно. При ежегодном внесении N40-80 продуктивность увеличилась соответственно на 20,5–20,9 %. Наибольшая продуктивность (7,19 т/га) отмечена на варианте с внесением N40P40 по фону 1 т/га фосфогипса, относительно варианта без применения удобрений (см. рисунок).

Важнейшей задачей научных исследований в агрохимии является выявление закономерностей влияния возрастающих доз удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность севооборота в целом. Вид и степень зависимости урожайности от изучаемых факторов можно определить при помощи корреляционно-рег-

Влияние доз фосфогипса и минеральных удобрений на валовый сбор зерна зернопарового севооборота, т/га (2012–2014 гг.)

рессионного анализа. Тесноту связи между двумя показателями в первом приближении можно оценить, рассчитав коэффициент линейной корреляции r и вывести соответствующие уравнения регрессии.

Корреляционно-регрессионный анализ результатов исследований, полученных в условиях 2012 г., показал среднее прямое линейное влияние на урожайность культуры доз фосфогипса и азотных удобрений – коэффициент корреляции 0,503 и 0,377 соответственно (табл. 1). Ведущую роль в повышении продуктивности агроценозов в большинстве опытов играют азотные удобрения, действие которых наиболее полно проявляется на фоне достаточной обеспеченности почв фосфором и калием, однако в первый год исследований (2012 г.) после парового предшественника наибольшую зависимость в опыте оказало внесение фосфогипса в запас.

Форма зависимости урожайности от возрастающих доз удобрений точнее изображается не в виде прямой линии, а в виде параболы или левой ветви параболы. То есть для построения уравнения регрессии может быть недостаточно линейного уравнения. Так, в условиях 2012 г. при расчете нелинейной корреляции было выявлено, что урожайность пшеницы в одинаковой степени зависела от использования азотного удобрения и фосфогипса – корреляционное отношение η составило 0,558 и 0,506 соответственно. Определить наличие нелинейной зависимости урожайности пшеницы от доз фосфорного удобрения не представилось возможным из-за применения в опыте только двух доз данного агрохимиката.

Для более точного прогнозирования урожайности при внесении возрастающих доз нескольких удобрений целесообразно построить уравнение множественной регрессии, включающее сразу несколько влияющих параметров. В первую очередь нами было построено уравнение линейной множественной зависимости урожайности от доз фосфогипса, азотных и фосфорных удобрений. Коэффициент корреляции составил 0,665. После чего путем подбора в программе Statistica параметров уравнения было установлено, что в большей степени урожайность яровой пшеницы по пару зависела в 2012 г. линейно от доз фосфогипса и фосфора, а также от доз азота в $\frac{1}{2}$ степени. Причем такое уравнение более точно описывало зависимость урожайности от изучаемых факторов, чем линейное. Коэффициент корреляции при этом составил 0,717.

Зависимость урожайности культур от возрастающих доз трех разных удобрений лучше всего описывается двумя видами уравнений. Это либо уравнение вида $Y = a_0 + a_1N^{0,5} + a_2N + a_3P^{0,5} + a_4P + a_5K^{0,5} + a_6K + a_7(NP)^{0,5} + a_8(NK)^{0,5} + a_9(PK)^{0,5}$, либо уравнение вида $Y = a_0 + a_1N + a_2N^2 + a_3P + a_4P^2 + a_5K + a_6K^2 + a_7NP + a_8NK + a_9PK$, где N, P, K – дозы удобрений, a_0 – a_9 – коэффициенты. По данным исследований 2012 г. удалось получить коэффициенты только для построения уравнения первого вида, коэффициент корреляции для которого составил 0,817. Таким образом, по результатам полевого опыта, проведенного в условиях 2012 г., было получено уравнение, описывающее зависимость урожайности яровой пшеницы после парового предшественника от доз фосфогипса, азотных и фосфорных удобрений с достаточно высоким уровнем тесноты связи – изменения урожайности культуры зависели от исследуемых факторов на 66,7 %.

Таблица 1

Подбор математической модели зависимости урожайности яровой пшеницы по пару Y , т/га, от доз фосфогипса G , кг/га, азотных N и фосфорных P удобрений, кг д.в./га (Курганская ГСХА, 2012 г.)

Форма зависимости	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r между предск. и факт. Y
Линейная парная	$Y = 0,06G + 1,14$	0,503
	$Y = 0,000528P + 1,15$	0,217
	$Y = 0,000563N + 1,14$	0,377
Нелинейная парная	$Y = 1,137 + 0,04G + 0,02G^2$	0,506
	$Y = 1,128 + 0,00269N - 0,000027N^2$	0,558
Линейная множественная	$Y = 1,101944 + 0,06G + 0,000528P + 0,000563N$	0,665
	$Y = 1,093906 + 0,06G + 0,006N^{0,5} + 0,000528P$	0,717
Нелинейная множественная	$Y = 1,092735 + 0,075758G - 0,04387G^{0,5} - 0,000861P + 0,011873P^{0,5} - 0,001972N + 0,022746N^{0,5} + 0,002275(PN)^{0,5} + 0,00411(ФN)^{0,5} - 0,000825(PN)^{0,5}$	0,817

Во второй год исследований увеличилась зависимость урожайности пшеницы от внесения аммиачной селитры ($r = 0,743$) и суперфосфата ($r = 0,429$). По-видимому, повышение эффективности азотных удобрений в рассматриваемом опыте обусловлено улучшением погодных условий при возделывании изучаемой культуры в 2013 г., по сравнению с 2012 г. (табл. 2). Анализ нелинейной парной зависимости также показал увеличение влияния доз азота на урожайность пшеницы. Уравнение множественной линейной регрессии позволило предсказывать урожайность пшеницы с точностью 82,6 % (коэффициент аппроксимации $r^2=0,826$). Однако наиболее точными моделями, описывающими зависимость урожайности от трех изучаемых факторов, были уравнения нелинейной множественной регрессии. Коэффициенты корреляции между данными урожайности и дозами агрохимикатов составили 0,942–0,986.

В условиях 2014 г. внесение азотного удобрения оказало наибольшее влияние на урожайность ячменя. Последействие фосфогипса и суперфосфата показало более слабую взаимосвязь с урожайностью культуры. Коэффициент корреляции между дозами азотного удобрения и урожайностью ячменя составил 0,715, дозами фосфорного удобрения и урожайностью – 0,364. Действие фосфогипса было еще более слабым. Это вызвано низкой обеспеченностью почвы нитратным азотом и реакцией культуры на фоне высокого выноса предшествующей культурой. Расчет коэффициента корреляции в нелинейной парной зависимости указывает на существенность влияния доз азота (табл. 3). Также как в предыдущие годы наиболее точными моделями, описывающими зависимость урожайности от фосфогипса, азота и фосфора были уравнения нелинейной множественной регрессии. Теснота связи между факторными и результативными показателями была высокой ($r = 0,924$ –0,968).

В целом за севооборот ежегодное применение азотного удобрения оказало наибольшее влияние на зерновые культуры (табл. 4). Высокая эффективность объясняется в первую очередь режимом увлажнения и весенними запасами влаги в почве. Подбор математической модели наиболее точно описывающей зависимость суммарной продуктивности севооборота от трех изучаемых удобрений показал, что несмотря на наличие средней линейной связи между фосфогипсом, суперфосфатом и продуктивностью и сильной – между дозами аммиачной селитры и продуктивностью. Более высокие коэффициенты корреляции были получены при расчете нелинейной зависимости между дозами фосфогипса, азота и продуктивностью севооборота. Наибольший коэффициент корреляции вновь отмечен в уравнениях нелинейной множественной регрессии ($r = 0,954$ –0,986).

Из приведенных выше уравнений регрессии видно, что рассматриваемые факторы в севообороте вызвали положительную реакцию возделываемых культур. Наиболее значительным и устойчивым было взаимодействие фосфогипса и азотного удобрения. Менее сильным было влияние фосфорного удобрения.

Исследования в области построения математических моделей, описывающих влияние разнообразных факторов на формирование продуктивности агроэкосистем, ведутся с прошлого века. Существуют имитационные модели, учитывающие десятки разнообразных параметров, позволяющие рассчитывать реакцию растений на их изменения с

Таблица 2

Подбор математической модели зависимости урожайности яровой пшеницы по пшенице Y , т/га, от доз фосфогипса Φ , кг/га, азотных N и фосфорных P удобрений, кг д.в./га (Курганская ГСХА, 2013 г.)

Форма зависимости	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r между предск. и факт. Y
Линейная парная	$Y = 0,126667\Phi + 2,07$	0,300
	$Y = 0,003694P + 2,06$	0,429
	$Y = 0,003917N + 1,98$	0,743
Нелинейная парная	$Y = 2,058 + 0,287\Phi - 0,16\Phi^2$	0,320
	-	-
	$Y = 1,95 + 0,00817N - 0,000053N^2$	0,778
Линейная множественная	$Y = 1,841111 + 0,126667\Phi + 0,003694P + 0,003917N$	0,909
Нелинейная множественная	$Y = 1,805701 + 0,130263\Phi^{0,5} + 0,035619N^{0,5} + 0,003694P$	0,942
	$Y = 1,728357 - 0,09727\Phi + 0,232659\Phi^{0,5} + 0,001425P + 0,039535P^{0,5} - 0,001101N + + 0,056729N^{0,5} - 0,005147(PN)^{0,5} + 0,001484(\Phi N)^{0,5} - 0,004241(PN)^{0,5}$	0,986

Таблица 3

Подбор математической модели зависимости урожайности ячменя Y , т/га, от доз фосфогипса Φ , кг/га, азотных N и фосфорных P удобрений, кг д.в./га (2014 г.)

Форма зависимости	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r между предск. и факт. Y
Линейная парная	$Y = 0,213333\Phi + 3,13$	0,248
	$Y = 0,006389P + 3,11$	0,364
	$Y = 0,007688N + 2,93$	0,715
Нелинейная парная	$Y = 3,113 + 0,453\Phi - 0,24\Phi^2$	0,261
	-	-
	$Y = 2,812 + 0,0258N - 0,000227N^2$	0,865
Линейная множественная	$Y = 2,698056 + 0,213333\Phi + 0,006389P + 0,007688N$	0,840
	$Y = 2,603572 + 0,217465\Phi^{0,5} + 0,006389P + 0,075626N^{0,5}$	0,924
	$Y = 2,53769 - 0,296737\Phi + 0,522791\Phi^{0,5} - 0,002323P + 0,059576P^{0,5} - 0,013385N + + 0,195807N^{0,5} + 0,015868(PN)^{0,5} - 0,012359(\Phi N)^{0,5} - 0,001709(PN)^{0,5}$	0,968

Подбор математической модели зависимости суммарной продуктивности севооборота Y , т/га, от доз фосфогипса Φ , кг/га, азотных N и фосфорных P удобрений, кг д.в./га (Курганская ГСХА, 2012–2014 гг.)

Форма зависимости	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r между предск. и факт. Y
Линейная парная	$Y = 0.133333\Phi + 2,11$	0,301
	$Y = 0.003528P + 2.11$	0,390
	$Y = 0.004063N + 2.02$	0,733
Нелинейная парная	$Y = 2,103 + 0.26\Phi - 0.127\Phi^2$	0,312
	-	-
	$Y = 1,963 + 0.0123N - 0.000103N^2$	0,849
Линейная множественная	$Y = 1,880833 + 0,133333\Phi + 0,003528P + 0,004063N$	0,883
Нелинейная множественная	$Y = 1,834193 + 0,134392\Phi^{0.5} + 0,003528P + 0,039165N^{0.5}$	0,954
	$Y = 1.786554 - 0.109433\Phi + 0,241051\Phi^{0.5} + 0.003726P + 0.009867P^{0.5} - 0.005517N + 0,091935N^{0.5} + 0.004011(PN)^{0.5} - 0.002155(\Phi N)^{0.5} - 0,002248(PN)^{0.5}$	0.986

шагом в один день [17]. Однако, данные модели (уже реализованные в виде программных продуктов) не пользуются высоким спросом у сельскохозяйственных организаций. Иногда даже сами авторы таких разработок указывают на их избыточную сложность и невостребованность. К тому же точность работы таких моделей высока только в условиях, схожих с теми, где были получены исходные опытные данные для них. При изменении почвенно-климатических условий, смене сорта возделываемой культуры точность падает [18]. Таким образом, даже авторы таких моделей указывают на достаточную точность прогнозирования урожайности обычных регрессионных уравнений, разработанных в типичных условиях для местности, где их планируется использовать [13].

Полученные в работе математические модели показывают существующие зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от изучаемых факторов. На основании этих зависимостей нами разрабатывается программное обеспечение, при помощи которого сельхозтоваропроизводители смогут более точно прогнозировать величину урожая культуры в зависимости от сочетаний и доз применяемых удобрений и гидрогеля в условиях Зауралья. И наоборот планировать систему удобрения для получения программируемой урожайности сельскохозяйственных культур. Безусловно данный программный продукт помимо представляемых математических моделей должен учитывать зависимость урожайности и от других факторов – почвенные, погодные и другие условия.

Заключение. Использование в севообороте агрохимикатов привело к увеличению его валового сбора зерна от 6,5 до 34,1 % по вариантам опыта. Наибольшая отзывчивость культур отмечается при совместном применении азотных и фосфорных удобрений по 40 кг /га на фоне 1 т/га фосфогипса.

Эффект взаимодействия, характеризующийся дополнительной прибавкой урожайности за счет совместного внесения основных видов удобрений, закономерно повышался с увеличением их доз. Динамика взаимодействия элементов питания во времени была различной. Наибольшая теснота взаимодействия в 2012 г. отмечается у фосфогипса ($r = 0,503$), в 2013–2014 гг. при внесении азотного удобрения $r = 0,743–0,715$.

Использование агрохимикатов в сельскохозяйственных предприятиях должно базироваться на научно обоснованных нормах и сочетаниях. При подборе оптимальных параметров применения удобрений необходимо учитывать не только потребности культур, но и финансовые показатели хозяйства с целью получения наибольшего агроэкономического эффекта.

Список литературы

1. Аканова Н. И., Шеуджен А. Х., Андреев А. А., Визирская М. М., Лиманский А. Н. Научное обоснование использования отходов промышленности в качестве вторичных ресурсов в сельскохозяйственном производстве // Международный сельскохозяйственный журнал. 2017. № 6. С. 48–52.
2. Аканова Н. И. Эффективные решения повышения плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур. // Плодородие. 2020. № 2 (113). С. 29–32.
3. Антоненко Д. А., Мельник О. А., Никифорова Ю. Ю. Влияние органо-минеральных удобрений на свойства чернозема выщелоченного и состав почвенной мезофауны // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 64. С. 43–51.
4. Гагарин А. Г., Рогачев А. Ф. Прогнозирование урожайности на основе анализа кросс-региональных данных // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 2 (50). С. 339–346.
5. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): учебник для студентов высших сельскохозяйственных учебных заведений по агрономическим специальностям. (Изд. 6-е, стер., перепеч. с 5-го изд. 1985 г.). – М., 2011. – 385 с.
6. Кузнецов Д. А. Влияние минеральных удобрений и норм высева на урожайность и качество зерна яровой пшеницы // Аграрный научный журнал. 2020. № 11. С. 25–29.
7. Низомов С. С. Применение методов статистического моделирования при прогнозировании урожайности зерновых культур // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. № 2 (30). С. 132–135.
8. Рогачев А. Ф. Формирование и анализ многолетних рядов урожайности зерновых для нейросетевого прогнозирования и обоснования агротехнологических мероприятий // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 1 (61). С. 347–356.
9. Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В. Обоснование алгоритмов и инструментария для нейросетевого прогнозирования урожайности агрокультур с использованием ретроспективных данных // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 1 (57). С. 290–302.

10. Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В. Формирование и использование базы данных статистической информации ретроспективной урожайности зерновых культур // Московский экономический журнал. 2020. № 4. С. 31.
11. Система адаптивно-ландшафтного земледелия Курганской области / под ред. А. Л. Иванова. Куртамыш, 2012. 494 с.
12. Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья / О. В. Волынкина [и др.]; под ред. О. В. Волынкиной. Куртамыш, 2017. 284 с.
13. Топаж А.Г. Динамические модели продуктивности: тупик или распутье? // Математические модели природных и антропогенных экосистем: сборник статей, посвященный памяти Ратмира Александровича Полуэктова. СПб., 2014. С. 48–69.
14. Чибис В. В. Влияние средств химизации на продуктивность полевых севооборотов в условиях лесостепи Западной Сибири // Аграрный научный журнал. 2019. № 7. С. 40–43.
15. Чибис В. В. Моделирование продуктивности севооборотов в условиях лесостепи западной Сибири // Живые и биокосные системы. 2017. № 20. С. 5.
16. Шеуджен А. Х. Агрохимия чернозёма. Майкоп, 2015. 232 с.
17. Якушев В. П. Роль математического моделирования в управлении современными системами земледелия и опытного дела // Математические модели природных и антропогенных экосистем: сб. статей, посвящ. памяти Ратмира Александровича Полуэктова. СПб., 2014. С. 5–14.
18. Mirschel W., Poluektov R. A., Topaj A., Badenko V. L., Terleev V., Wenkel K.-O. Crop growth modeling across different scales – advantages and disadvantages // Математические модели природных и антропогенных экосистем: сб. статей, посвящ. памяти Ратмира Александровича Полуэктова. СПб., 2014. С. 70–93.
19. Yin X., Kersebaum K. Ch., Kollas Ch., Manevski K., Baby S., Beaudoin N., Öztürk I., Gaiser T., Wu L., Hoffmann M., Charfeddine M., Conradt T., Constantin Ju., Ewert F., de Cortazar- Atauri I. G., Giglio L., Hlavinka P., Hoffmann H., Launay M., Louarn G. et al. Multi-model uncertainty analysis in predicting the yield of nitrogen in cereal grains for crop rotations in Europe // Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia. 2018. P. 278-282.

References

1. Akanova N. I., Sheudzhen A. Kh., Andreev A. A., Vizirskaya M. M., Limansky A.N. Scientific ground of the industrial waste usage as secondary resources in agricultural production. *International Agricultural Journal*. 2017;(6):48–52. (In Russ.).
2. Akanova N. I. Effective solutions to increase soil fertility and crop yields. *Plodorodie*. 2020;2 (113):29–32. (In Russ.).
3. Antonenko D. A., Melnik O. A., Nikiforenko Yu. Yu. The organo-mineral fertilizers Influence on the properties of leached chernozem and the composition of soil mesofauna. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2017;(64):43–51. (In Russ.).
4. Gagarin A. G., Rogachev A. F. Yield forecasting based on the analysis of cross-regional data. *Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*. 2018;2 (50):339–346. (In Russ.).
5. Dospikhov B. A. Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results): a textbook for students of higher agricultural educational institutions in agronomic specialties. (6th ed., Erased, reprinted from the 5th ed. 1985). Moscow, 2011. 385 p. (In Russ.).
6. Kuznetsov D. A. The influence of mineral fertilizers and seeding rates on the yield and grain quality of spring wheat. *Agrarian Scientific Journal*. 2020;(11):25–29. (In Russ.).
7. Nizomov S. S. The use of statistical modeling methods in predicting the yield of grain crops. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2014;2 (30):132–135. (In Russ.).
8. Rogachev A. F. Formation and analysis of long-term series of grain yields for neural network forecasting and substantiation of agro-technological measures *Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*. 2021;1 (61):347–356. (In Russ.).
9. Rogachev A. F., Melikhova E. V. Substantiation of algorithms and tools for neural network forecasting of crop yields using retrospective data. *Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*. 2020;1 (57):290–302. (In Russ.).
10. Rogachev A.F., Melikhova E.V. Formation and use of statistical information database on the retrospective yield of grain crops. *Moscow Economic Journal*. 2020;(4):31. (In Russ.).
11. The system of adaptive landscape agriculture in the Kurgan region / Ed. A.L. Ivanova. – Kurtamys. 2012. 494 p. (In Russ.).
12. Fertilization systems in agricultural technologies of the Trans-Urals / O.V. Volynkin et al.; ed. O. V. Volynkina. Kurtamys. 2017. 284 p. (In Russ.).
13. Topazh A. G. Dynamic Productivity Models: Dead End or Crossroads? // Mathematical models of natural and anthropogenic ecosystems: a collection of articles dedicated to the memory of Ratmir Aleksandrovich Poluektov. SPb. 2014. P. 48 –69. (In Russ.).
14. Chibis V. V. The influence of chemicals on the productivity of field crop rotations in the forest-steppe conditions of Western Siberia. *The Agrarian Scientific Journal*. 2019;(7):40–43. (In Russ.).
15. Chibis V. V. Productivity of crop rotations modeling in the forest-steppe conditions of western Siberia. *Zhivye i biokosnye sistemy*. 2017;(20):5. (In Russ.).
16. Sheudzhen A. Kh. Agrochemistry of chernozemic soil. Maikop. 2015. 232 p. (In Russ.).
17. Yakushev V. P. The mathematical modeling role in the management of modern farming systems and experimental work // Mathematical models of natural and anthropogenic ecosystems: a collection of articles dedicated to the memory of Ratmir Aleksandrovich Poluektov. SPb. 2014. P. 5–14. (In Russ.).
18. Mirschel W., Poluektov R. A., Topaj A., Badenko V. L., Terleev V., Wenkel K.-O. Crop growth modeling across different scales – advantages and disadvantages // Mathematical models of natural and anthropogenic ecosystems: a collection of articles dedicated to the memory of Ratmir Aleksandrovich Poluektov. SPb. 2014. P. 70–93.
19. Yin X., Kersebaum K. Ch., Kollas Ch., Manevski K., Baby S., Beaudoin N., Öztürk I., Gaiser T., Wu L., Hoffmann M., Charfeddine M., Conradt T., Constantin Ju., Ewert F., de Cortazar- Atauri I. G., Giglio L., Hlavinka P., Hoffmann H., Launay M., Louarn G. et al. Multi-model uncertainty analysis in predicting the yield of nitrogen in cereal grains for crop rotations in Europe. In the book: Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia. 2018. P. 278–282.

Статья поступила в редакцию 29.06.2021; одобрена после рецензирования 21.10.2021; принята к публикации 30.10.2021.

The article was submitted 29.06.2021; approved after reviewing 21.10.2021; accepted for publication 30.10.2021.