

УДК 631.8:519.24
Код ВАК 06.01.04

DOI: 10.52463/22274227_2021_39_13

И.В. Синявский¹, А.М. Плотников², А.В. Созинов², Н.Д. Гущенская²

ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В СЕВООБОРОТЕ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ САПРОПЕЛЕЙ, ИЗВЕСТИ, АЗОТНОГО И ФОСФОРНОГО УДОБРЕНИЯ

¹ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ», ЧЕЛЯБИНСК, РОССИЯ

²ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КУРГАНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ ИМЕНИ Т.С. МАЛЬЦЕВА», КУРГАН, РОССИЯ

I.V. Sinyavskiy¹, A.M. Plotnikov², A.V. Sozinov², N.D. Gushchenskaya²

ESTIMATING OF CROP YIELD DEPENDENCE IN CROP ROTATION FROM THE USE OF SAPROPELS, LIME, NITROGEN AND PHOSPHORUS FERTILIZER

¹FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION «SOUTH URAL STATE
AGRARIAN UNIVERSITY», CHELYABINSK, RUSSIA

²FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION «KURGAN STATE
AGRICULTURAL ACADEMY NAMED AFTER T.S. MALTSEV», KURGAN, RUSSIA

Игорь Васильевич Синявский

Igor Vasilievich Sinyavskiy
доктор биологических наук, доцент
ORCID 0000-0001-8282-0421
AuthorID 436140
alex_mich79@mail.ru

Андрей Викторович Созинов

Andrey Viktorovich Sozinov
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
ORCID 0000-0002-5286-1561
AuthorID 439493
savrey@ya.ru

Алексей Михайлович Плотников

Aleksey Mikhailovich Plotnikov
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
ORCID 0000-0002-9145-976X
AuthorID 651983
alex_mich79@mail.ru

Наталья Дмитриевна Гущенская

Natalya Dmitrievna Gushchenskaya
кандидат экономических наук, доцент
ORCID 0000-0003-1220-6084
AuthorID 307170
casich78@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования. Разработать приёмы увеличения продуктивности зерновых культур под влиянием сапропелей, извести и минеральных удобрений, провести корреляционно-регрессионный анализ результатов исследований, на основе которого построить математические модели, описывающие характер воздействия изучаемых факторов на урожайность зерновых культур в зернопаровом севообороте лесостепного Зауралья. **Методика.** Исследования, включая полевые, лабораторные наблюдения и эксперименты. Результаты исследований обрабатывались методом дисперсионного анализа данных однофакторного и многофакторного опытов, а также методом линейной корреляции по Б.А. Доспехову. Для выявления зависимостей урожайности зерновых культур от применяемых удобрений был использован множественный корреляционно-регрессионный анализ в программе Statistica 12. **Результаты.** В результате проведенных исследований по урожайности сельскохозяйственных культур в зернопаровом севообороте лесостепного Зауралья была показана эффективность использования сапропелей в дозе 20 т/га с известью и минеральными удобрениями (N30P30). Общая продуктивность севооборота на контрольном варианте составила 5,25 т/га з.е., при внесении минеральных удобрений она возросла до 6,13 т/га з.е. В целом применение минерального удобрения оказало наибольшее влияние на зерновые культуры – коэффициент корреляции с продуктивностью составил за три года 0,899. Более высокие коэффициенты корреляции были получены при расчете линейной зависимости между сапропелями, известью, азотно-фосфорными

удобрениями и продуктивностью севооборота. Коэффициент корреляции в уравнениях множественной регрессии составил 0,984. **Научная новизна.** Ранее проводимые исследования в лесостепи Зауралья не позволяли в полной мере изучить зависимость урожайности от параметров плодородия чернозема выщелоченного, применяемых удобрений и мелиорантов. Работы по исследованию зависимости урожайности зерновых культур с использованием метода математического моделирования в условиях интенсивной химизации земледелия приобрели особую актуальность.

Ключевые слова: зерновые культуры, сапропель, урожайность, известь, азотно-фосфорные удобрения, корреляция, регрессия.

Abstract. The purpose of the study. To develop methods for increasing the productivity of grain crops with the help of spropels, lime and mineral fertilizers to conduct a correlation-regression analysis of the results of studies on the basis of which to build mathematical models describing the nature of the effects of the studied factors on the yield of grain crops in the grain crop rotation of the forest-steppe zone of Trans-Urals. **Methodology.** The research, including field, laboratory observations and experiments. The results of the studies were processed by the method of dispersion analysis of data from single-factor and multi-factor experiments, as well as by the method of linear correlation according to B.A. Dospekhov. Multiple correlation-regression analyses in Statistica 12 were used to identify crop yields versus fertilizers used. **Results.** As a result of studies on crop yields in grain

crop rotation of the forest-steppe zone of Trans-Urals, the efficiency of sapropele using at a dose of 20 t/ha with lime and mineral fertilizers (N30P30) was shown. The total productivity of crop rotation on the control version was 5.25 t/ha z.e., when introducing mineral fertilizers, it increased to 6.13 t/ha z.e. In general, the use of mineral fertilizer had the greatest impact on grain crops - the correlation coefficient with productivity was 0.899 over three years. Higher correlation coefficients were obtained when calculating the linear relationship between sapropeles, lime, nitrogen-phosphorus fertilizers and crop rotation productivi-

ty. The correlation coefficient in the multiple regression equations was 0.984. **Scientific novelty.** The earlier studies in the forest-steppe of the Trans-Urals did not allow to study properly the dependence of yields on the fertility parameters of leached chernozem, fertilizers and meliorants used. Work on the study of the dependence of crop yields using the method of mathematical modeling in conditions of intensive chemization of agriculture has become especially relevant.

Keywords: grain crops, sapropele, yield, lime, nitrogen-phosphorus fertilizers, correlation, regression.

Введение. Определению оптимальных доз удобрений под сельскохозяйственные культуры при разработке системы удобрения в севообороте, нахождению правильного соотношения между азотом, фосфором и калием обычно придается ключевое значение. Большинство авторов считает, что основным методом определения оптимумов в применении минеральных удобрений является полевой опыт, в котором удается сравнить действие возрастающих доз каждого из питательных веществ, отзывчивость на удобрения повышением урожайности культур и по кривым отзывчивости на возрастающие дозы определить оптимальные дозы [1, 2, 3].

При интенсивном земледелии азот и фосфор могут оказаться элементами, сдерживающими рост урожая и качество продукции. Все это создает предпосылки появления дефицита элементов в почвах сельскохозяйственного назначения [4, 5].

Важным является определение широты распространения полученных разных результатов в лесостепном Зауралье [6, 7, 8, 9].

Одним из альтернативных видов органического удобрения является сапропель. Сапропель широко распространен на земном шаре и встречается преимущественно в областях бывшего оледенения. Мощность отложений различна. Обычно для озер лесной полосы она равна 3-10 м. Однако встречаются отложения мощностью и 20-40 м. Общие запасы сапропеля в нашей стране оценены в 92 млрд. т в пересчете на 60%-ую влажность. Много сапропелевых озер в Ленинградской, Архангельской, Псковской, Свердловской областях и в Карелии [10].

Полевыми опытами подтверждена целесообразность использования сапропеля в Сибири [11], Челябинской [12], Тюменской [13], Курганской областях [14], в условиях Северного Казахстана [15].

В России известные запасы сапропеля составляют 45 млрд. м³. В Курганской области территориальным балансом учтено 118 озёрных месторождений сапропеля. Общая площадь сапропелевых отложений составляет 15588,9 га с геологическими запасами 132,593 млн. тонн. В настоящее время ни одно из месторождений не

разрабатывается [16].

Сапропель как высококачественное органоминеральное удобрение применяется на всех типах почв, для увеличения содержания в почве гумуса, азота и микроэлементов, улучшения водно-физических свойств почвы, нейтрализации кислотности. Рекомендуемые дозы сапропеля под зерновые культуры составляют 20-40 т/га, под пропашные – 50-100 т/га [10].

В ходе решения практических задач оптимизации почвенного питания растений особое значение приобретает принцип дифференцированного и комплексного подхода при осуществлении мероприятий по повышению и улучшению качества биологической продуктивности угодий. Известь, сапропель оказывают свое положительное влияние на почву и растения в течение ряда лет. Более того, правильное использование удобрений обеспечивает ещё и неуклонное увеличение плодородия почвы [3].

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.

Применение метода математического моделирования позволяет более четко систематизировать материалы научных исследований в системе «почва-урожай», наиболее глубоко и всесторонне изучить зависимость урожайности сельскохозяйственных культур в севообороте от параметров плодородия почвы и удобрений [17-24].

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.

Важной задачей в системах удобрения является выявление темпов изменения эффективности основных видов минеральных удобрений по мере увеличения длительности их

применения. Ранее проводимые исследования в лесостепи Зауралья не позволяли в полной мере изучить зависимость урожайности от параметров плодородия чернозема выщелоченного, применяемых удобрений и мелиорантов. Работы по исследованию зависимости урожайности зерновых культур с использованием метода математического моделирования в условиях интенсивной химизации земледелия приобрели особую актуальность.

Цель проведенных исследований – разработать приемы увеличения продуктивности зерновых культур под влиянием сапропелей, извести и минеральных удобрений, провести корреляционно-регрессионный анализ результатов исследований, на основе которого построить математические модели, описывающие характер воздействия изучаемых факторов на урожайность зерновых культур в зернопаровом севообороте лесостепного Зауралья.

Методика. В 2014 году на опытном поле Курганской ГСХА был заложен полевой стационарный опыт по изучению эффективности сапропелей, извести и минеральных удобрений в отдельности и в различных сочетаниях с азотным и фосфорным минеральными удобрениями в посевах сельскохозяйственных культур.

Почва опытного поля – чернозем выщелоченный слабогумусированный маломощный легкосуглинистый. Характеризуется следующими показателями: количество фракций <0,01 мм в горизонте Апах составляет 22,4%; содержание гумуса – 3,32%; ёмкость катионного обмена – 20,5 мг.-экв./ 100 г почвы, степень насыщенности основаниями – 80,8%, рН солевой вытяжки – 5,24 ед.; плотность сложения – 1,15 г/см³, твердой фазы – 2,61 г/см³, общая пористость – 55,9%, ВЗ – 7,0%; содержание (по Чирикову) подвижного фосфора – 119 мг/кг, обменного калия – 148 мг/кг; мощность горизонтов (Апах+АВ) – 36 см. При анализе структурно-агрегатного состава чернозёма содержание агрономически ценных агрегатов составило в пахотном горизонте 60,5% и 53,1 – в подпахотном.

Севооборот 4-польный с чередованием культур: пар – яр, пшеница – яр, пшеница – ячмень. Закладку полевого стационарного опыта проводили в четырехкратной повторности во времени.

Размещение вариантов в повторениях рендомизированное. Повторения расположены в четыре яруса. Общая площадь делянки – 15 м², учетная – 12 м² (2х6 м). Сапропели и известь вносили под предпосевную культивацию с заделкой на глубину 10-12 см.

Схема опыта представляла собой матрицу трехфакторного полного факториального эксперимента и включала 12 вариантов. Фактор А – известь (CaCO₃) (0 и 2,0 т/га для нейтрализации 1/2 гидролитической кислотности). Фактор В – ежегодное внесение минеральных удобрений (0 и N30P30). Фактор С – сапропель (0 и 20 т/га). В опыте использовались сапропели Курганской (№ 1 (С1) и Свердловской (№ 2 (С2) областей. Сапропели характеризовались следующими показателями: сапропель № 1 – рН – 7,76; зольность – 29,8%; N – 7,05%; P₂O₅ – 0,53%; K₂O – 0,23%; CaO – 47,8%, сапропель № 2 - рН – 4,40; зольность – 55,6%; N – 4,11%; P₂O₅ – 0,41%; K₂O – 0,40%; CaO – 23,2%. Химический мелиорант, используемый в опыте, представлен известняковой мукой (CaCO₃ – 85%, влажность – 1,2%, наличие недействительных частиц – 1,5%). Гидролитическая кислотность на момент закладки опыта составляла 3,81 мг.-экв./100 г почвы. В качестве минеральных удобрений применяли азотно-фосфорное смешанное удобрение аммиачная селитра (N_{aa} – 34,6% д.в.) и суперфосфат простой (P_{ор} – 26% д.в.), вносили вразброс ежегодно перед посевом согласно схеме опыта.

Высевали яровую пшеницу сорта Жигулевская, ячмень сорта Прерия с нормой высева 5,0 млн. всхожих зерен на гектар. Посев в 2014 году проводили 1 июня посевным комплексом АПП – 7,2, уборку – в фазу полной спелости 10 октября; в 2015 году посев проводили 2 июня, уборку – 10 сентября; в 2016 году посев проводили 30 мая, уборку – 25 августа.

Результаты исследований обрабатывались методом дисперсионного анализа данных однофакторного и многофакторного опытов, а также методом линейной корреляции по Б.А. Доспехову [25]. Для выявления зависимостей урожайности зерновых культур от применяемых удобрений был использован множественный корреляционно-регрессионный анализ в программе Statistica 12.

Результаты. Погодные условия в период вегетации 2014 года сложились неблагоприятно – в начальный период развития растений были отмечены высокие температуры – на 3-5 градусов выше среднемноголетних. Отсутствие осадков и суховеи отмечались до конца июня. Затем в течение трех недель июля преобладала низкая температура воздуха и обильные осадки различной интенсивности. Июль оказался самым холодным и самым влажным – количество осадков составило 141,6 мм при норме 60 мм. Август оказался близок к среднемноголетним показате-

лям. Гидротермический коэффициент составил 0,92 единицы. В 2015 году метеорологические условия были также неблагоприятными для сельскохозяйственных культур. В мае температура была выше среднеемноголетних значений на 1,2 °С, осадков выпало 212% от нормы. Июнь также был жарким – + 3,7°С, а осадков выпало 40,8% от нормы. Июль, август были холодными и дождливыми. Гидротермический коэффициент составил 1,32 единицы. Сложившиеся погодные условия вегетационного периода 2016 года, в основном, можно считать благоприятными для сельскохозяйственных культур. Но в отдельные периоды отмечалось обильное выпадение осадков. Температура воздуха и количество выпавших осадков были близки к среднеемноголетним показателям. Гидротермический коэффициент вегетационного периода равен 1,07 единицы.

Общая продуктивность севооборота на контрольном варианте составила 5,25 т/га з.е. (ежегодно по 1,75 т/га), а при внесении минеральных удобрений – 6,13 т/га з.е. Наибольшую продуктивность обеспечил вариант на фоне известкования с применением сапропеля 2 и минеральных удобрений, где продуктивность возросла до 6,41 т/га з.е., что на 1,16 т/га (или на 22,1%) больше, чем на контроле (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-регрессионного анализа. Тесноту связи между двумя показателями в первом приближении можно оценить, рассчитав коэффициент линейной корреляции (r) и выведя соответствующее уравнение регрессии.

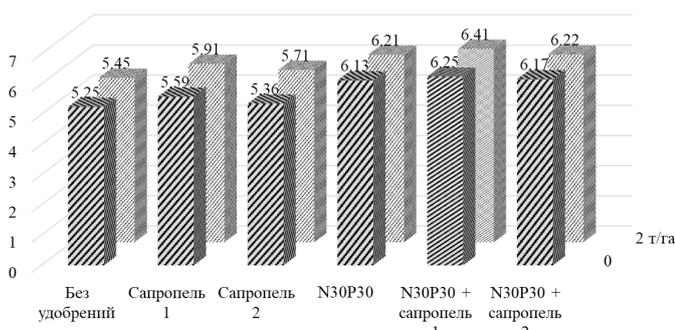


Рисунок – Продуктивность зернопарового севооборота при внесении сапропелей и азотно-фосфорного удобрения на фоне известкования и без него, т.з.ед./га (Курганская ГСХА, 2014-2016 гг.)

Ведущую роль в повышении продуктивности зерновых культур в нашем опыте играли азотно-фосфорные удобрения, действие которых наиболее полно проявлялось на фоне достаточной обеспеченности растений калием и другими элементами питания. Корреляционно-регрессионный анализ результатов исследований, полученных в условиях 2014 года, показал среднее влияние на урожайность культуры доз азотно-фосфорных удобрений (таблица 1). После парового предшественника наименьшую зависимость в опыте ввиду его замедленного действия на почву оказало внесение известкового мелиоранта, коэффициент корреляции r составил 0,164.

Таблица 1 – Подбор математической модели зависимости урожайности яровой пшеницы (Y) в т/га от доз сапропеля (C) в кг/га, доз извести (И) в т/га, азотно-фосфорных (NP) удобрений в кг д.в./га (Курганская ГСХА, 2014 г.)

Форма зависимости	Математическая модель	r между предск. и факт. Y
Линейная парная	$Y = 0.015833I + 1,87$	0,164
	$Y = 0.002028NP + 1,83$	0,629
	$Y = 0.004875C(1) + 1,85$	0,427
	$Y = 0.00175C(2) + 1,85$	0,172
Линейная множественная	$Y = 1,7525 + 0,02125I + 0,002375NP + 0,004875C(1)$	0,779
	$Y = 1,765 - 0,0025I + 0,00275NP + 0,00175C(2)$	0,830

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 азотно-фосфорных удобрений с разными сапропелями (C1 и C2). Коэффициент корреляции составил соответственно – 0,779 и 0,830.

Во второй год исследований увеличилась зависимость урожайности пшеницы также от внесения минеральных удобрений, коэффициент корреляции был еще больше (r=0,825) и последствия извести – r=0,371. Повышение эффективности извести в рассматриваемом опыте обусловлено улучшением доли растворимости мелиоранта, созданием благоприятной среды за счет снижения избыточной кислотности в почве (таблица 2). Во второй год, как и в 2014 году, отмечается средняя взаимосвязь сапропеля, по-

лученного в Курганской области ($r=0,427-0,426$). Уравнение множественной линейной регрессии позволило предсказывать урожайность пшеницы с точностью 68,0% (коэффициент аппроксимации $r^2=0,680$).

Таблица 2 – Подбор математической модели зависимости урожайности яровой пшеницы по пшенице (Y) в т/га от доз сапропеля (C) в кг/га, доз извести (И) в т/га, азотно-фосфорных (NP) удобрений в кг д.в./га (Курганская ГСХА, 2015 г.)

Форма зависимости	Математическая модель	г между предск. и факт. Y
Линейная парная	$Y = 0.040833И + 1,55$	0,371
	$Y = 0.003028NP + 1,50$	0,825
	$Y = 0.005C(1) + 1,54$	0,426
	$Y = 0.0025C(2) + 1,54$	0,262
Линейная множественная	$Y = 1,40 + 0,045И + 0,003083NP + 0,005C(1)$	0,975
	$Y = 1,4175 + 0,04И + 0,002667NP + 0,0025C(2)$	0,975

В условиях 2016 года внесение минерального удобрения также оказало наибольшее влияние на урожайность ячменя. Последствие извести и сапропелей показало слабую взаимосвязь с урожайностью культуры. Коэффициент корреляции между азотно-фосфорным удобрением и урожайностью ячменя составил 0,927, известью и урожайностью – 0,193 (таблица 3).

Таблица 3 – Подбор математической модели зависимости урожайности яровой пшеницы по пшенице (Y) в т/га от доз сапропеля (C) в кг/га, доз извести (И) в т/га, азотно-фосфорных (NP) удобрений в кг д.в./га (Курганская ГСХА, 2016 г.)

Форма зависимости	Математическая модель	г между предск. и факт. Y
Линейная парная	$Y = 0.04И + 2,37$	0,193
	$Y = 0.006389NP + 2,22$	0,927
	$Y = 0.004125C(1) + 2,38$	0,209
	$Y = 0.001C(2) + 2,38$	0,046
Линейная множественная	$Y = 2,1625 + 0,02875И + 0,006208NP + 0,004125C(1)$	0,978
	$Y = 2,1225 + 0,0475И + 0,006917NP + 0,001C(2)$	0,970

Наиболее точными моделями, описывающими зависимость урожайности от извести, азота и фосфора, как и в предыдущие годы, были уравнения линейной множественной регрессии.

Теснота связи между факторными и результативными показателями в этом случае была наивысшей за три года ($r = 0,970-0,978$).

В целом за севооборот действие и последствие извести, сапропелей оказали наименьшее влияние на культуры (таблица 4). Высокая эффективность минеральных удобрений объясняется в первую очередь их ежегодной степенью растворимости и доступностью для растений за счет режима увлажнения в мае-июне. Наибольший коэффициент корреляции вновь отмечен в уравнениях линейной множественной регрессии ($r=0,984$).

Таблица 4 – Подбор математической модели зависимости средней урожайности зерновых (Y) от доз извести (И) в т/га, азотно-фосфорного (NP) удобрения в кг д.в./га и сапропеля в т/га (2014-2016 гг.)

Форма зависимости	Математическая модель	г между предск. и факт. Y
Линейная парная	$Y = 0.0325И + 1,93$	0,256
	$Y = 0.003806NP + 1,85$	0,899
	$Y = 0.004625C(1) + 1,92$	0,351
	$Y = 0.00175C(2) + 1,92$	0,136
Линейная множественная	$Y = 1,77 + 0,03375И + 0,003875NP + 0,004625C(1)$	0,984
	$Y = 1,77 + 0,0275И + 0,004083NP + 0,00175C(2)$	0,984

Из приведенных выше уравнений регрессии видно, что рассматриваемые факторы в севообороте вызвали положительную реакцию возделываемых культур. Наиболее значительным и устойчивым было взаимодействие азотно-фосфорного удобрения. Слабым было влияние сапропеля (C2) и известкового мелиоранта.

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 шагом в один день [26]. 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 невосприимчивость. К тому же точность работы та-

ких 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 [27]. Таким образом, даже авторы таких моделей указывает на достаточную точность прогнозирования урожайности обычных регрессионных уравнений, разработанных в типичных условиях для местности, где их планируется использовать [28].

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 – почвенных, погодных и других условий.

Выводы.

1. Ежегодное применение минеральных удобрений увеличило продуктивность зерновых культур на 16,8%, от органических удобрений она повысилась на 2,1-6,5%, а при совместном использовании извести, сапропеля и азотно-фосфорного удобрения – на 18,5-22,1% до 6,41 т/га.
2. Эффект взаимодействия, характеризующийся дополнительной прибавкой урожайности за счет совместного использования мелиоранта и удобрений, закономерно повышался. Величина взаимодействия азотно-фосфорных удобрений оставалась примерно на одном уровне в течение ротации севооборота. Коэффициент корреляции по годам варьировал в пределах 0,628-0,927.
3. Взаимодействие сапропелей с урожайностью было различно. Сапропель Курганской области в первые два года показал среднюю связь, в то время как сапропель Свердловской области в течение ротации севооборота показал низкую взаимосвязь с урожайностью зерновых культур, коэффициент корреляции отмечен в пределах 0,046-0,262.
4. Для установления оптимального насыщения севооборота удобрениями следует исходить из планируемых параметров оптимизации. В производственных условиях обеспеченность хозяйств удобрениями не может быть одинаковой. В этом случае подбор оптимальных доз удобрений необходимо решать на основе поиска такого их соотношения, которое обеспечит максимальный агроэкономический эффект от имеющихся ресурсов удобрений. В исследованиях 2014-2016 гг. наибольшая эффективность получена от минеральных удобрений и сапропеля Курганской области.

Список литературы

- 1 Аристархов А.Н. Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах. М.: ЦИНАО, 2000. 522 с.
- 2 Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: Агропромиздат, 1990. 219 с.
- 3 Шеуджен А.Х. Агрохимия чернозёма. Майкоп: ОАО «Полиграф-ЮГ», 2015. 232 с.
- 4 Севообороты и агротехнологии для современного земледелия Зауралья / под ред. С.Д. Гилева. Куртамыш: ГУП «Куртамышская типография», 2010. 126 с.
- 5 Чумаченко И.Н. Фосфор в жизни растений и плодородие почв. М.: ЦИНАО, 2003. 124 с.
- 6 Егоров В.П., Кривонос Л.А. Почвы Курганской области. Курган: Издательство «Зауралье», 1995. 176 с.
- 7 Кузнецов П.И., Егоров В.П. Научные основы экологизации земледелия в лесостепи Зауралья. Курган: Издательство «Зауралье», 2001. 366 с.
- 8 Система адаптивно-ландшафтного земледелия Курганской области / под ред. А.Л. Иванова. Куртамыш: ГУП «Куртамышская типография», 2012. 494 с.
- 9 Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья / под ред. О.В. Волынкиной. Куртамыш: ООО «Куртамышская типография», 2017. 284 с.
- 10 Штин С.М. Озерные сапропели и их комплексное освоение / под ред. И.М. Ялтанца. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. 373 с.
- 11 Гамзиков Г.П., Гамзиков О.И., Широ-

ких П.С. Возможности использования нетрадиционных удобрений в сибирском земледелии // Достижения науки и техники АПК. 2012. № 3. С. 9-12.

12 Органические удобрения и практика их применения в Челябинской области / А.В. Вражнов [и др.] // Аграрный вестник Урала. 2008. № 9 (51). С. 50-54.

13 Изучение и хозяйственное использование торфяных и сапропелевых ресурсов: сборник материалов Международного симпозиума (18-20 июля 2006 г.) Тюмень: Тюменская государственная сельскохозяйственная академия, 2006. 324 с.

14 Созинов А.В. Реакция яровых зерновых на внесение озерного сапропеля на выщелоченном черноземе центральной части Курганской области: материалы Международной научно-практической конференции «Стратегия инновационного развития агропромышленного комплекса» (25-26 апреля 2013). Курган: Изд-во Курганской ГСХА, 2013. С. 378-382.

15 Перспективы использования в условиях Северного Казахстана удобрений на основе местного сырья / П.С. Дмитриев [и др.] // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 4-1. С. 123-128.

16 Природные ресурсы и охрана окружающей среды Курганской области в 2013 году. Доклад. Курган, 2014. 220 с.

17 Бисчоков Р.М. Адаптивное нечетко-логическое моделирование урожайности сельскохозяйственных культур для Кабардино-Балкарской республики // Вестник Курганской ГСХА. 2021. № 2 (38). С. 10-15.

18 Моделирование продуктивности агроэкосистем / Н.Ф. Бондаренко [и др.]. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 264 с.

19 Иванова Т.И. Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. М.: Агропромиздат, 1989. 240 с.

20 Перегудов В.Н. Метод наименьших квадратов и его применение в исследованиях. М.: Статистика, 1965. 340 с.

21 Полушкина Т.В., Шапкина И.А. Математическое моделирование как один из методов научного познания // Вестник Курганской ГСХА. 2014. № 4 (12). С. 75-77.

22 Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистем. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 312 с.

23 Динамические модели экологических систем / Р.А. Полуэктов [и др.]. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 347 с.

24 Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов [и др.]. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 396 с.

25 Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

26 Якушев В.П. Роль математического моделирования в управлении современными системами земледелия и опытного дела // Математические модели природных и антропогенных экосистем: сборник статей, посвященный памяти Ратмира Александровича Полуэктова. СПб.: АФИ, 2014. С. 5-14.

27 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: сборник статей, посвященный памяти Ратмира Александровича Полуэктова. СПб.: АФИ, 2014. С. 70-93.

28 Топаж А.Г. Динамические модели продуктивности: тупик или распутье? // Математические модели природных и антропогенных экосистем: сборник статей, посвященный памяти Ратмира Александровича Полуэктова. СПб.: АФИ, 2014. С. 48-69.

List of references

1 Aristarchov A.N. Optimization of plant nutrition and the use of fertilizers in agroecosystems. M.: TSINAO, 2000. 522 p.

2 Kulakovskaya T.N. Optimization of the agrochemical system of soil nutrition of plants. M.: Agropromizdat, 1990. 219 p.

3 Sheujen A.Kh. Agrochemistry of chernozem. Maykop: OJSC Polygraph-SOUTH, 2015. 232 p.

4 Crop rotation and agricultural technologies for modern agriculture of the Trans-Urals / ed. S.D. Gilev. Kurgan: State Unitary Enterprise «Kurgan Printing House», 2010. 126 p.

5 Chumachenko I.N. Phosphorus in plant life and soil fertility. M.: TSINAO, 2003. 124 p.

6 Egorov V.P., Krivonos L.A. Soils of the Kurgan region. Kurgan: Publishing House «Trans-Urals», 1995. 176 p.

7 Kuznetsov P.I., Egorov V.P. Scientific foun-

dations for the greening of agriculture in the forest-steppe of the Trans-Urals. Kurgan: Publishing House «Trans-Urals», 2001. 366 p.

8 System of adaptive and landscape agriculture of the Kurgan region / ed. A.L. Ivanov. Kurtamysh: State Unitary Enterprise «Kurtamysh Printing House», 2012. 494 p.

9 Fertilizer systems in agricultural technologies of the Trans-Urals / under the editor. O.V. Volynkina. Kurtamysh: Kurtamysh Printing House LLC, 2017. 284 p.

10 Shtin S.M. Lake sapropels and their comprehensive development / ed. I.M. Yaltanets. M.: Publishing House of Moscow State Mining University, 2005. 373 p.

11 Gamzikov G.P., Gamzikov O.I., Shiroki-kh P.S. Opportunities for the use of unconventional fertilizers in Siberian agriculture // Achievements of Science and Technology of AIC. 2012. № 3. Pp. 9-12.

12 Organic fertilizers and the practice of their use in the Chelyabinsk region / A.V. Vrazhnov [et al.] // Agricultural Bulletin of the Ural. 2008. № 9 (51). Pp. 50-54.

13 Study and economic use of peat and sapropel resources: collection of materials of the International Symposium (July 18-20, 2006) Tyumen: Tyumen State Agricultural Academy, 2006. 324 p.

14 Sozinov A.V. The reaction of spring grains to the introduction of lake sapropel on the leached chernozem of the central part of the Kurgan region: materials of the International Scientific and Practical Conference «Strategy for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex» (April 25-26, 2013). Kurgan: Publishing House of the Kurgan State Agricultural Academy, 2013. Pp. 378-382.

15 Prospects for using fertilizers based on local raw materials in Northern Kazakhstan / P.S. Dmitriev [et al.] // Topical problems of humanities and natural sciences. 2014. № 4-1. Pp. 123-128.

16 Natural resources and environmental protection of the Kurgan region in 2013. Report. Kurgan, 2014. 220 p.

17 Bischoikov R.M. Adaptive fuzzy-logical modeling of crop yields for the Kabardino-Balkarian Republic // Vestnik Kurganskoy GSKhA. 2021. № 2 (38). Pp. 10-15.

18 Modeling of Agroecosystems Productivity

/ N.F. Bondarenko [et al.]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982. 264 p.

19 Ivanova T.I. Prediction of fertilizer efficiency using mathematical models. M.: Agropromizdat, 1989. 240 p.

20 Peregudov V.N. Least squares method and its application in research. M.: Statistics, 1965. 340 p.

21 Polushkina T.V., Shapkina I.A. Mathematical modeling as one of the methods of scientific knowledge // Vestnik Kurganskoy GSKhA. 2014. № 4 (12). Pp. 75-77.

22 Poluektov R.A. Dynamic models of agroecosystems. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991. 312 p.

23 Dynamic models of ecological systems/R.A. Poluektov [et al.]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982. 347 p.

24 Crop Production Process Models/P.A. Poluektov [et al.]. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2006. 396 p.

25 Dospekhov B.A. Field experience methodology (with the basics of statistical processing of research results). 5th ed., supplement and processing. M.: Agropromizdat, 1985. 351 p.

26 Yakushev V.P. The role of mathematical modeling in the management of modern agricultural and experimental systems // Mathematical models of natural and anthropogenic ecosystems: a collection of articles devoted to the memory of Ratmir Alexandrovich Poluektov. St. Petersburg: AFI, 2014. Pp. 5-14.

27 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 Alexandrovich Poluektov. St. Petersburg: AFI, 2014. Pp. 70-93.

28 Topazh A.G. Dynamic models of productivity: dead end or crossroads ? // Mathematical models of natural and anthropogenic ecosystems: a collection of articles dedicated to the memory of Ratmir Alexandrovich Poluektov. St. Petersburg: AFI, 2014. Pp. 48-69.