

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова
ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи

Кочетков Иван Максимович

**Эффект применения гуминовых препаратов на урожай, качество и
антиоксидантную активность *Solanum tuberosum L.***

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук, профессор
Верховцева Надежда Владимировна

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Физиолого-биохимические особенности <i>Solanum tuberosum</i> L. при агрохимической поддержке (обзор литературы)	11
1.1. Характеристики <i>Solanum tuberosum</i> L. сорта «Удача»	11
1.2. Соединения с антиоксидантной активностью у картофеля	14
1.2.1. Методы определения антиоксидантной активности	24
1.2.2. Антиоксидантная активность растений и гуминовые вещества	26
1.3. Крахмал картофеля, его применение и физиологические свойства	27
1.4. Влияние гуминовых препаратов на физиологические свойства, в частности, крахмал и антиоксидантную активность картофеля	30
1.5. Заключение по обзору литературы.....	34
Глава 2. Объекты и методы исследования.....	36
2.1. Метод закладки полевого опыта.....	36
2.2.1. Учёт урожая и определение качественных показателей сырых клубней картофеля	37
2.2.2. Определение содержания веществ в зафиксированном картофеле	38
2.3. Определение общей антиоксидантной активности клубней	38
2.4. Фракционный состав крахмала картофеля	39
2.5. Определение антиоксидантной активности гуминовых препаратов	40
2.6. Агрохимические характеристики почвы	41
2.7. Метод оценки погодных условий	42
2.8. Статистическая обработка.....	42
Глава 3. Результаты и обсуждения	44
3.1. Агрохимические показатели почвы	44
3.2. Антиоксидантная активность используемых ГП	45
3.3. Метеорологические условия в вегетационные периоды.....	45
3.4. Урожайность картофеля, выход товарной продукции	47
3.5. Содержание калия и фосфора в клубнях картофеля.....	51
3.6. Содержание азота	53

3.7. Содержание витамина С и антиоксидантная активность клубней	55
3.8. Содержание крахмала и его резистентной фракции.....	57
3.9. Обсуждение результатов и корреляционные зависимости.....	59
3.10. Анализ данных методом главных компонент	66
Заключение.....	72
Выводы	74
Список сокращений.....	76
Список использованной литературы.....	77
Приложения	96

Введение

Актуальность темы исследования. По данным FAOSTAT картофель является одной из четырех самых потребляемых овощных растений в мире – с 2019 по 2022 год картофель входит в десятку наиболее выращиваемых культур в мире. Культура имеет низкий углеродный след и не требует тщательного ухода при своем выращивании, по сравнению со многими другими овощами, а также фруктами и зерновыми, обеспечивая большую часть необходимых людям питательных веществ. Картофель имеет промышленное, кормовое, пищевое, а также севооборотное значение (Gustavsen, 2021). При этом по получению картофеля Российская Федерация входит в лидеры среди стран, и производит свыше 18 миллионов тонн клубней (FAOSTAT 2019, 2020, 2021, 2022). Однако с ростом потребления картофеля в мире, возрастают вопросы, связанные с безопасностью потребления картофеля, в частности, в сферах диетического питания (Молявка, 2021). Особое внимание уделяется содержанию в клубнях таких соединений как: антиоксиданты (АО), укрепляющие иммунную систему человека (Bendich, 1993; Khadim, Al-Fartusie, 2020) и резистентный крахмал (РК), который нельзя назвать «быстрым» углеводом, чем он ценен в диетическом питании (Higgins, 2014).

Из минеральных элементов для картофеля калий (K^+) является наиболее важным макроэлементом и играет значительную роль в растениях, например, в осморегуляции, в создании мембранныго потенциала $\Delta\psi$, транспорте сахаридов, адаптации к стрессу и росту в целом (Sanyal et al., 2020; Sardans and Peñuelas, 2021). Для транспорта ионов калия (K^+) существует ряд путей, однако их регуляция при низком и высоком содержании элемента во внешней среде остается, в целом, неопределенной. K^+ выполняет регуляторную роль в различных биохимических процессах, связанных с синтезом белка, углеводным обменом и активацией ферментов (Hasanuzzaman et al., 2018). Многие физиологические процессы основаны на K^+ -связанном фотосинтезе и устьичном контроле этого процесса. Он также обеспечивает устойчивость к абиотическому стрессу, а в условиях засоления K^+

поддерживает ионный гомеостаз и контролирует осмотический баланс (Assaha et al., 2017; Kumar et al., 2020). Макроэлемент регулирует открытие устьиц в условиях засухи и помогает растениям акклиматизироваться в условиях водного дефицита (Aksu, Altay, 2020; Johnson et al., 2022). Абиотические стрессовые условия, такие как засоление, засуха, высокие и низкие температуры и заморозки, приводят к образованию активных форм кислорода (АФК) в растениях. Увеличивающийся объем экспериментальных данных свидетельствует о том, что повышение уровня питания растения K^+ может значительно повысить устойчивость к абиотическому стрессу за счет снижения АФК в растениях (Johnson et al., 2022).

Степень разработанности проблемы. Проблема повышения современных показателей питательной ценности картофеля (как РК, так и АО) исследуется во всём мире, в частности за счёт применения на полях биопрепаратов (Abdirahman, 2022; Patel, Gurjar, Patel, 2022). В их число входят препараты на основе гуминовых веществ. Гуминовые препараты (далее ГП) позволяют не только экологически безопасно снизить затраты на производство сельскохозяйственной продукции, но и сохраняют объем и качество получаемого урожая (Bulgari et al., 2015). В состав ГП входят физиологически активные соединения такие, как хиноны, фенолы и карбоновые кислоты (Melo et al., 2016; Якименко, Терехова, 2011), которые содержат легко отдающие водород карбонильные и карбоксильные группы (OH/OOH) и определяют их антиоксидантные свойства. Благодаря этим соединениям ГП обладают физиологической активностью и способствуют повышению устойчивости растений к стрессу (Cordeiro et al., 2011; Suzuki et al., 2012; García et al., 2012; Calvo et al., 2014). Кроме того, гуминовые вещества в составе ГП обладают фунгицидными (Siddiqui et al., 2009) и бактерицидными (Hassett, Bise, Hartenstein, 1987; Fujimura, Katayama, Kuwatsuka, 1994) свойствами. Также отмечалось, что ГП способствуют поглощению макро- (Bezuglova et al., 2017) и микроэлементов (Chen, Stevenson, 1986), росту и развитию растений (Nardi, Pizzeghello, 2002), повышению их устойчивости к абиотическим и

биотическим воздействиям (Куликова, 2008), при этом наблюдается оптимизация агрохимических свойств почв за счет экссудатов сельскохозяйственных культур (Calvo et al., 2014).

Обзор публикаций о влияние калия в стрессовых условиях растений (особенно калиелюбивых) при формировании их защитных систем в последние годы в мире (Johnson et al., 2022) стал основанием для второго направления нашего исследования на примере картофеля.

Цель и задачи. Целью исследования было изучение влияния гуминовых препаратов с антиоксидантной активностью на урожай и качество *Solanum tuberosum L.*

В задачи исследования входило:

1. Изучить влияние гуминовых препаратов на урожайность картофеля и его структуру.
2. Исследовать эффект гуминовых препаратов на ряд биохимических характеристик клубней картофеля на низком и высоком фоне минеральных удобрений.
3. Показать значение применения дополнительного калийного удобрения на содержание аскорбиновой кислоты (первичного антиоксиданта) и суммарной антиоксидантной активности продукции картофеля.
4. Проанализировать в каких погодных условиях вегетационного периода выращивания картофеля повышается антиоксидантная активность клубней.
5. Определить в каких условиях выращивания повышается содержание крахмала и его резистентной фракции.

Научная новизна исследования. Впервые показано, что при фолиарной обработке растений картофеля гуминовыми препаратами Гумистар Универсальный и БиоГумат, полученными методом щелочного гидролиза из вермикомпоста и бурого угля, соответственно, на фоне минеральных удобрений, в фазу начала и окончания цветения, происходит увеличение АО активности клубней.

Впервые показано, что дополнительное калийное удобрение (K_2SO_4) при посадке оказало положительное влияние на содержание аскорбиновой кислоты (первичного антиоксиданта) в клубнях картофеля в неблагоприятный (засушливый) вегетационный период выращивания культуры.

Теоретическая и практическая значимость. Данные, полученные в работе, носят фундаментальный характер, так как они демонстрируют влияние погодных условий и различных форм удобрений на биохимические характеристики клубней картофеля, раскрывают влияние ГП на урожайность, АО свойства и содержание фракций крахмала продукции. В прикладном отношении выводы диссертационной работы могут быть использованы для повышения устойчивости культуры к стрессовым ситуациям в период выращивания, что оказывает положительное влияние на выход товарного картофеля. Эти результаты могут быть применены в сельском хозяйстве для повышения продуктивности растений и увеличению их питательной ценности для населения.

Объект исследования. Объектом исследования служили клубни картофеля (*Solanum tuberosum L.*) сорта Удача, полученные в ходе полевого опыта на базе учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ «Чашниково».

Методология и методы исследования. Методология исследования основывалась на результатах, полученных в течение трех лет на полевых опытах с картофелем, заложенных на территории учебно-опытного почвенно-экологического центра «Чашниково» МГУ в 2019, 2021 и 2022 гг., а также в результате лабораторных методов исследования по общепринятым методикам. Полученные экспериментальные данные подвергались статистической обработке.

Положения, выносимые на защиту.

1. Применение ГП даже на низком уровне минерального питания эффективно повышает выход товарных клубней картофеля в неблагоприятный по метеоусловиям год (засуха) выращивания культуры и оказывает

положительное влияние на содержание питательных веществ в клубнях картофеля.

2. Повышение содержания общего и резистентного крахмала в клубнях картофеля получено при выращивании культуры в благоприятные по метеоусловиям вегетационные периоды (накопление большего количества углеводов), тогда как в неблагоприятных условиях (засуха) метаболизм растений направлен на белковый обмен (накопление большего количества белка).

Степень достоверности и апробации результатов. При проведении исследования были использованы современные методы исследования, соответствующие поставленным целям и задачам работы. Эксперименты проведены в достоверных для статистики биологических и аналитических повторностях. Сформулированные в тексте диссертации научные положения и выводы основаны на экспериментальных данных, приведенных в тексте и рисунках печатной работы. Полученные научные положения диссертации и выводы базируются на результатах собственных исследований автора или на данных, полученных при его непосредственном участии.

Основные исследования были представлены на конференциях «Актуальные теоретические и практические проблемы аграрной науки и пути их решения» (Ташкент, 2020), «Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов 2020"» (Москва, 2020), «Прошлое, настоящее состояние и перспективы развития овощеводства, картофелеводства и виноградарства Таджикистана» (Душанбе, 2024), научно-практической конференции, посвященной 160-летию Д.Н. Прянишникова в рамках мероприятий 300-летия РАН (Кяхта, 2025), а также на заседаниях кафедры агрохимии и биохимии растений факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова.

Личный вклад автора. Автор принимал личное участие в планировании экспериментов, подготовке образцов и проведении экспериментальной работы, анализе, интерпретации и обсуждении

полученных результатов. Автор участвовал в написании статей, опубликованных по результатам работы, и представлении результатов на научных конференциях. Результаты работы и их обсуждение написаны автором самостоятельно.

Публикации автора по результатам исследования. По результатам проведённого исследования опубликованы 4 печатные работы, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в докторской диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

Структура и объём докторской диссертации. Диссертация изложена на 115 страницах машинописного текста и состоит из «Введения», «Обзора литературы», «Объектов и методов исследования», «Результатов и обсуждения», «Заключения», «Выводов», «Списка литературы», «Приложения». В работе представлено 3 таблицы, 24 рисунка и 18 приложений. Список литературы включает 171 источник (из них 139 на иностранном языке).

Благодарности. Автор выражает свою искреннюю благодарность научному руководителю: профессору, д.б.н. Надежде Владимировне Верховцевой за всестороннюю помощь и поддержку, научное руководство в выполнение данной работы, обсуждение и анализе результатов. Автор выражает благодарность заведующему кафедры агрохимии и биохимии растений, факультета почвоведения МГУ им. Ломоносова д.б.н. Владимиру Аркадьевичу Романенкову, а также сотрудникам кафедры агрохимии и биохимии растений за помощь в освоении методик, анализу результатов и рекомендациям по улучшению докторской диссертации. Автор чрезвычайно признателен к.б.н., с.н.с. учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ Евгению Никитичу Кубареву за помощь в постановке и проведения полевого опыта с картофелем. Автор выражает признательность к.б.н., заведующей лаборатории фитонанотехнологий ИФР РАН Венжик Юлии Валерьевне и к.б.н., с.н.с. Дерябину Александру Николаевичу; к. б. н.,

научному сотруднику института биохимии им. А.Н. Баха Федотовой Татьяне Анатольевне за помощь в проведении исследований; заведующей лабораторией технологии модификации крахмала, ВНИИК Лидии Борисовне Кузиной, а также рабочему коллективу лаборатории за оказанную в ходе исследований помощь.

Глава 1. Физиолого-биохимические особенности *Solanum tuberosum* L.

при агрохимической поддержке (обзор литературы)

1.1. Характеристики *Solanum tuberosum* L. сорта «Удача»

Solanum tuberosum L. или картофель – это многолетнее растение, используемое во всём мире как одна из основных выращиваемых культур в сельском хозяйстве по всему миру (FAOSTAT 2019, 2020, 2021, 2022). К основным характеристикам клубней относятся крахмал, белок, аскорбиновая кислота, сухое вещество, минеральные вещества (Букасов и др., 1975), содержание которых может изменяться в зависимости от региона культивирования (Щербакова и др., 2012; Жукова, Ким, 2017).

С биохимических позиций исследователей привлекают вещества, которые растения синтезируют не только для своего питания, как соединения, обеспечивающие энергетический и конструктивный метаболизм (редуцирующие и нередуцирующие сахарины, общие сахарины), но и как вещества, выполняющие защитные функции у растений. Среди них низкомолекулярные соединения - фенолы, флавоноиды, полиамины, каротиноиды, антоцианы и др. Эти, так называемые вторичные метаболиты, обладают антиоксидантными свойствами. Также, в отличие от животных, растения способны накапливать значительные количества низкомолекулярных АО, которые вносят существенный вклад в их антиоксидантную защиту (Колупаев и др., 2019). С точки зрения питательной ценности для человека такие соединения необходимы в рационе, так как не синтезируются человеком, но способны выполнять защитную функцию от реакционных соединений с неспаренным электроном. Концентрация и стабильность этих химических соединений в растении зависит от несколько факторов, таких как сорт, место культивирования, методы и приемы сельскохозяйственных технологий, принятых во время выращивания, климатические изменения и т.д.

Solanum tuberosum L., сорта «Удача» (рис.1) является результатом работы ГНУ ВНИИ картофельного хозяйства имени А.Г. Лорха. Сорт

считается средне-раннеспелым, столовым и адаптированным к различным регионам Российской Федерации (Реестер РФ 9001808).



Рисунок 1. Растения картофеля сорта «Удача» в конце фазы цветения. Фотография сделана во время проведения полевого опыта на базе учебного почвенно-экологический центра МГУ Чашниково, 2019.

Период созревания картофеля сорта «Удача» – от 65 до 80 дней, что соответствует показателям второй группы по раннеспелости сортов картофеля (Реестер РФ 9001808).

Содержание крахмала в картофеле сорта «Удача» принято считать от 13 до 15 % от массы сырых клубней (Реестер РФ 9001808). Средняя урожайность сорта составляет 43 т/га. В России лучшие урожаи снимают в Средневолжском, Центрально-Черноземном и Дальневосточном районах (Федотов и др., 2006).



Рисунок 2. Клубни картофеля сорта «Удача» в конце фазы цветения. Фотография сделана во время проведения опытов на базе почвенно-экологический центра МГУ Чашниково, 2022.

Тонкая кожура светлого кремового, бежевого или желтоватого цвета. Клубни гладкие на ощупь. Глазки — небольшие, хорошо заметны на светлой кожуре. Они могут быть тёмно-коричневого, сероватого или рыжеватого

цвета. Цвет клубней — светлый бежевый, может становиться немного интенсивнее, до светло-коричневого. Форма — клубни округлой или круглоовальной формы (рис. 2), в основном не слишком вытянутые. Мякоть сырого, свежеразрезанного картофеля белого цвета (Симаков и др., 2005).

Масса или размер клубней — сравнительно крупные клубни картофеля Удача, однако, редко бывают гигантскими. Средний клубень весит в пределах от 120 до 250 г, но более мелкие клубни тоже пользуются спросом. Куст вырастает средней высоты, но при этом очень густой, часто покрытый листьями. Цветы снежно-белого цвета. Их лепестки заметно отогнуты. Листья интенсивного тёмно-зелёного цвета, матовые (Симаков и др., 2005).

1.2. Соединения с антиоксидантной активностью у картофеля¹

Высшим растениям, которые эволюционно пришли к кислородному образу жизни, было необходимо разработать ряд механизмов и соединений защиты от активных форм кислорода (АФК), которые образуются при дыхании всех эукариотических организмов на Земле в электрон транспортной цепи (ЭТЦ), а у растений еще и при фотосинтезе при фотодыхании.

АФК возникают при неполном восстановлении молекулярного кислорода: супероксидрадикал (O_2^- , пероксидный радикал (H_2O_2), гидроксил радикал (OH^-), синглетный кислород (1O_2), пероксинитрит радикал ($ONOO^-$). В норме эти реактивные соединения образуются у растений в хлоропластах (Asada, 2006), митохондриях (Ohta, 2012), пероксисомах (Bleier, Dröse, 2013).

Особенность этих веществ состоит в том, что на их внешней электронной орбитали находится от одного до нескольких неспаренных электронов, называемых свободными радикалами. Эти радикалы, занимающие целую электронную орбиталь, обладают очень высокой

¹ Содержимое, изложенное в данной главе, опубликовано в следующей научной статье автора в журнале, рекомендованном для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова:

Кочетков И.М., Верховцева Н.В. Антиоксидантные свойства клубней картофеля (*Solanum tuberosum L.*) и влияние на них гуминовых веществ // Проблемы агрохимии и экологии. – 2024. – № 3. – С. 53-59. DOI: 10.26178/AE.2024.52.62.008.

активностью, способны к различным окислительным воздействиям, что приводит к негативным последствиям на организм. Реакции с их участием называются свободорадикальными реакциями кислорода (СРК) (Попков и др., 2012; Trianaphylidès, Havaux, 2009). При отсутствии или сбое в регулируемом процессе защиты (снижении их активности или полном гашении) АФК приводят растение в состояние стресса, болезни или гибели. В экспериментах *in vitro* было показано, что многие ферменты и вторичные соединения высших растений защищают их от окислительного повреждения путем ингибиования или подавления свободных радикалов и активных форм кислорода. О роли многих других соединений, как потенциальных антиоксидантов, можно судить по их сходству с синтетическими антиоксидантами родственной структуры. Данные подтверждают, по крайней мере, частичную антиоксидантную роль *in vivo* для многих классов растительных метаболитов (Larson, 1988; Mittler, 2002).

СРК могут выполнять и положительную роль, подвергая разрушению инфекционное начало (микробная или иная инфекции), которому могут подвергаться растения. В этом случае растения интенсивно дышат (происходит так называемый «дыхательный взрыв») и образующийся СРК выполняет функции защиты организма от патологии проникающих агентов за счет губительного действия энергии радикалов. Это положительная функция СРК.

При избытке СРК, которые возникают при облучение ультрафиолетом или радиацией, может происходить губительное воздействие и на само растение. Такие свободнорадикальные реакции могут разрушать клеточные мембранны, вмешиваться в метаболические процессы и в целом оказывать негативное влияние на организм (Днепровский и др., 1991). В свою очередь, для противодействия избытку свободных радикалов, организм использует вещества антиоксиданты. Эти вещества способны ингибировать процессы окисления в организмах, тем самым воздействуя на свободные радикалы (Смирнова и др., 2010).

Предпринималось немало попыток систематизации АО по различным признакам: молекулярная масса, механизм действия, гидрофобность и гидрофильность (Gill, Tuteja, 2010). Согласно классификации, базирующейся одновременно на механизме действия и молекулярной массе, выделяют следующие группы АО:

- 1) ферменты, обезвреживающие АФК (супероксиддисмутаза, СОД, каталаза и различные пероксидазы),
- 2) ферменты детоксикации липидов (глутатион-S-пероксидаза, фосфолипидгидропероксид-глутатионпероксидаза и др.),
- 3) низкомолекулярные АО (глутатион, аскорбиновая кислота, фенольные соединения, токоферолы, каротиноиды и др.),
- 4) регенераторы активных форм АО (монодегидроаскорбатредуктаза, дегидроаскорбатредуктаза, глутатионредуктаза) (Прадедова и др., 2011).

Кроме того, растения эволюционно выбрали «сидячий» образ жизни, что также заставило их выработать обширный арсенал защитных соединений, которые помогают переживать все воздействия окружающей среды, с которыми им приходится сталкиваться в процессе своего существования – в целом, по механизму их защитного действия их называют антиоксидантами (Antolovich et al., 2002). Так, в последние годы к АО также относят некоторые соединения, антиоксидантная функция которых не является основной, но при этом в стрессовых ситуациях они обладают защитными свойствами и накапливаются в больших количествах, при воздействии на растительных организм стресс-факторов (недостаточное увлажнение, низкотемпературное воздействие и другие) в больших количествах. Среди них, в первую очередь, выделяется аминокислота пролин и сахарины (Liang et al., 2013; Синькевич и др., 2009).

Большой набор АО — это защитный механизм растения от повреждений, вызванных окислительным стрессом. В этот перечень входят высоко эффективные ферменты (супероксиддисмутаза; каталаза; аскорбатпероксидаза; глутатионредуктаза; монодегидро-аскорбатредуктаза;

дегидроаскорбатредуктаза; глутатионпероксидаза; гвайколпероксидаза и глутатион-S-трансфераза) и неферментативные соединения (аскорбиновая кислота; глутатион; фенольные соединения, алкалоиды, небелковые аминокислоты и α -токоферолы) создают системы антиоксидантной защиты, которые действуют совместно, подавляя каскады неконтролируемого окисления и защищая растительные клетки от окислительного повреждения за счет удаления АФК (Alasalvar, 2001; Gill, Tuteja, 2010; Прадедова и др., 2011).

В свою очередь, можно разделить антиоксиданты на первичные и вторичные. Первичные антиоксиданты – это вещества способные служить донорами электронов и водородов, и, следовательно, имеющие низкий редокс-потенциал. Вторым свойством первичных антиоксидантов является способность при отдаче электронов и атомов превращаться в вещество с низкой реакционной способностью. Именно благодаря этим свойства первичные антиоксиданты способны обрывать цепную реакцию СРК (Antolovich et al., 2006).

Вторичные антиоксиданты предотвращают негативное воздействие СРК иными способами. В первую очередь, они способны хелатировать соединения переходных металлов. Во вторую, они гасят $^1\text{O}_2$. И в-третью, их воздействие позволяет нейтрализовать супероксид радикал и пероксид водорода (Antolovich et al., 2002).

1. Аскорбиновая кислота, известная также как витамин С – это один из важнейших витаминов, способный проявлять свойства как первичных, так и вторичных антиоксидантов. Редокс-потенциал за счёт трансформации аскорбиновой кислоты в монодегидроаскорбиновую кислоту (МДАК) при одноэлектронном окислении составляет 0,166, что обеспечивает высокую релевантность витамина С как первичного антиоксиданта. При этом две молекулы МДАК могут передавать электроны, в результате чего одна доокисляется до дидегидроаскорбиновой кислоты (ДАК), а вторая восстанавливается до аскорбиновой. МДАК и ДАК способны участвовать в

далнейших окислительно-восстановительных реакциях внутри клетки (Davey et al., 2000). Это и то, что аскорбиновая кислота может выступать в роли кофактора ферментов, обеспечивает её вторичные антиоксидантные свойства (Pignocchi, Foyer, 2003).

При этом важно помнить, что организм человека не способен самостоятельно синтезировать аскорбиновую кислоту. Это соединение он получает вместе с продуктами питания. Нехватка витамина С может вызывать серьёзные отклонения и именно поэтому содержание аскорбиновой кислоты в продуктах сельского хозяйства подвергается серьёзной оценке. Исключением не стал и картофель, в котором витамин С является одним из показателей качества продукции (Davey et al., 2000).

2. Каротиноиды – это пигменты, локализированные в хлоропластах и хромопластах растений. Синтез каротиноидов происходит в пластидах: хлоропластах для зелёных листьев и хромопластах для плодов, цветков и корнеплодах. Одним из важнейших свойств каротиноидов является их способность дезактивировать избыточное состояние синглетного хлорофилла посредством синглет-синглет конверсии, что предотвращает фотоокисление хлорофилла и потерю энергии. В случаях же, если хлорофилл перешёл в своё триплетное состояние, каротиноиды способны его вернуть в изначальную форму, переходя в триплетное состояние, со временем возвращаясь в синглетное состояние за счёт рассеивания энергии в виде тепла. В результате этих реакций проявляются антиоксидантные свойства каротиноидов, за счёт гашения триплетного хлорофилла и синглетного кислорода. (Delgado-Vargas et al., 2000). Человек не способен синтезировать каротиноиды, являющиеся для него провитамином А (Boon et al., 2010).

3. Терпеноидные хиноны и токохроманолы. В этой группе веществ необходимо выделить соединения, входящие в состав электрон-транспортных цепей двумембранных органоидов растений: витамины группы Е, токотриенолы и жирорастворимые хиноны. Антиоксидантная активность этих веществ обусловлена способностью переходить в форму феноксильного

радикала, с невысокой реактивностью за счёт делокализации неспаренного электрона (Jiang, 2014).

Одними из наиболее важных веществ этой группы являются коферменты Q. В митохондриях это убихиноны/убихинолы, препятствующих пероксидации липидов и восстанавливающих радикал витамина Е (αToc^\cdot), а в хлоропластах это пластохиноны/пластохинолы, выполняющие схожую роль (James, Smith, Murphy, 2004).

Витамин К также попадает в эту группу антиоксидантов. Филлохинон синтезируют только организмы, способные осуществлять фотосинтез, при этом у растений он участвует в фотосистеме I, принимая электроны от возбуждённых молекул хлорофилла, передавая их на железосерный белок Fx (Pravst et al., 2010). При этом, антиоксидантные свойства витамина К крайне высоки, он может значительно снижать пероксидацию липидов хлоропластов. Картофель из овощей обеспечивает значительное поступление этого витамина в организм человека, в пределах 5 мкг/100 г продукции, при суточной норме 100 мкг для взрослого человека (Damon et al., 2005).

4. Антиоксиданты пептидной и белковой природы. Наиболее распространённой антиоксидант белковой природы – глутатион. Его концентрация в цитоплазме растительной клетки может достигать до 4,8-5,3 мМ. Основная роль глутатиона – это его способность восстанавливать другие соединения (Bela et al., 2015). При этом, сам глутатион стабилен и после донирования (отдачи водорода) переходит в глутатион-дисульфид. Соотношение этих двух состояний белка часто используется в оценке редокс-системы. В растительных клетках за счёт аскорбатпероксидазы, глутатион участвует в аскорбат-глутатионовом цикле, выводя H_2O_2 из клетки (Gill et al., 2013).

В свою очередь, в картофельных клубнях содержится большой перечень полезных для здоровья человека антиоксидантов, таких как фенолы, флавоноиды (в том числе антоцианы), фолаты, каротиноиды и аскорбиновые кислоты (Manach et al., 2004). И одним из наиболее ценных антиоксидантов

являются фенольные соединения, играющие важную роль в его органолептических свойствах, и представляют собой большую группу вторичных химических компонентов клубней (Bravo, 1998; Beckman, 2000; Parr, Bolwell, 2000; Valcarcel et al., 2015). По химической структуре эти соединения можно разделить на фенольные кислоты, флавоноиды, дубильные вещества, стильбены, кумарины и лигнаны (Beckman, 2000; Ignat et al., 2010; Lemos et al., 2015).

Антиоксиданты картофеля представлены следующими соединениями с ароматической группой (Brown, 2005):

1. Основными фенольными кислотами в клубнях картофеля являются протокатеховая, ванилиновая, пара-кумаровая кислота (оксикоричная кислота). При этом, по сообщениям Mattila и Hellstrom (2007), в картофельных клубнях основными фенольными соединениями являются производные кофейной кислоты – хлорогеновая кислота (Mattila, Hellstrom, 2007). Также обнаружено умеренное количество кофейной кислоты и феруловой кислоты (Brown, 2005). Между эквивалентной антиоксидантной способностью (TEAC) показана сильная положительная линейная коррелятивная зависимость ($R^2 = 0,8193$) и общим содержанием фенолов. Содержание фенолов в картофеле варьирует от 530 до 1770 мкг/г (Al-Saikhan et al., 1995), что делает картофель третьим по значимости источником фенолов после яблок и апельсинов (Chun et al., 2005).

Фенольные соединения присутствуют как в кожуре, так и в мякоти картофеля, при этом их концентрация выше в кожуре, чем в мякоти. Свежая мякоть и кожура картофеля содержат от 30 до 900 мкг/кг и 1000-4000 мкг/кг, соответственно, хлорогеновой кислоты и незначительное количество других фенольных кислот от 0 до 30 мкг/кг (Lewis et al., 1999). Кожура клубней с фиолетовой и красной окраской содержала в два раза больше фенольных кислот, по сравнению с клубнями, у которых белая кожура. Мякоть клубней содержит более низкие концентрации - от 100 до 600 мкг фенольных кислот и от 0 до 30 мкг флавоноидов. Также, всё ещё наблюдается тенденция

повышения содержания веществ для окрашенных клубней – у растений с пурпурными и красными клубнями в три-четыре раза выше содержание фенолов, чем в клубнях с белой кожицей (Navarre et al., 2010).

2. Флавоноиды — это группа полифенольных соединений (имеющих три фенольных кольца – А, В, С). Флавоноиды широко распространены в качестве полифенольного компонента растений. Наличие гидроксильной группы в положении С-3 и С-4 кольца В этого фитосоединения отвечает за его антиоксидантный потенциал.

Антиоксидантные флавоноиды обнаружены в хлоропластах, что предполагает их фотосинтетическую роль в качестве поглотителей синглетного кислорода и стабилизаторов мембранны внешней оболочки хлоропласта. Дигидроксизамещенные флавоноиды В-кольца присутствуют в ядре клеток мезофилла и могут ингибировать генерацию АФК, образуя комплексы с Fe и Cu. Гены, управляющие биосинтезом антиоксидантных флавоноидов, и их регуляция в основном повышается в результате сильного стресса. Это говорит о том, что антиоксидантный метаболизм флавоноидов является характерной чертой наземных растений. Антиоксидантные флавоноиды могут эффективно контролировать ключевые этапы роста и дифференцировки клеток, тем самым регулируя развитие целого растения и отдельных органов (Giovanni et al., 2012).

Диапазон содержания флавоноидов в картофеле колеблется от 200 до 300 мкг/г сырой массы (Lewis et al., 1998). Флавоноиды, в порядке возрастания, представлены катехином, эпикатехином, эриодиктиолом, каемпферолом и налингенином (Brown et al., 2005). Флавоноиды, такие как антоцианы, присутствуют в значительных количествах в картофеле с пигментированной мякотью и варьируются от 5,5 до 35 мг/100 г сырого веса клубней картофеля (Brown, 2008). У фиолетовых и красных сортов картофеля концентрация флавоноидов в два раза выше, чем у белых сортов, и их концентрация значительно выше в кожуре, достигая 900 мг у фиолетовых и 500 мкг у красных сортов на 100 г сырой массы (Lewis et al., 1998).

Антоциановые пигменты находятся в перидерме картофеля и придают кожице различные цвета, наиболее распространенный из которых – фиолетовый. Пигментированный картофель может служить потенциальным источником природных антоциановых пигментов, поскольку это низкозатратная культура (Jansen, Flamme, 2006), а также значимый источник антиоксидантных микроэлементов (Andre et al., 2007). Картофель с фиолетовой мякотью содержал больше антоцианов, чем картофель с красной мякотью. Картофель с фиолетовой и красной мякотью может быть использован в пищевой промышленности в качестве основного источника натуральных красителей и антиоксидантов для улучшения здоровья человека (Reyes et al., 2004). Chu и др. (2000) обнаружили, что экстракты флавоноидов и флавонов обладают высокой активностью по уничтожению свободных радикалов кислорода (Chu et al., 2000).

При хранении клубней картофеля их антиоксидантная активность снижается. Так, показано, что за время 6-месячного хранения картофеля произошло снижение антиоксидантной способности в среднем по сортам на 12,4% (Marinova, Batchvarov, 2011).

3. Дубильная кислота – водорастворимое антитоксичное соединение, которое осаждает токсичные соединения, алкалоиды и белки; снижает использование минералов и витаминов и ограничивает активность пищеварительных ферментов. Дубильная кислота используется для лечения отравлений многими токсичными веществами, такими как стрихнин, птомаины и ядовитые грибы (Sulaiman et al., 2013).

Различные биотехнологические и трансгенные подходы показали возможность значительного увеличения содержания фенолов и флавоноидов (в том числе антоцианов) в клубнях картофеля (Lukaszewicz et al., 2004). Содержание фитонутриентов в картофеле зависит от условий окружающей среды и стадии развития. Картофель, собранный на молодой стадии развития, содержал более высокие концентрации некоторых фитонутриентов, таких как фолат и хлорогеновая кислота, чем зрелые клубни картофеля (Navarre et al.;

2010; Goyer, Navarre, 2009). Общее содержание каротиноидов также было выше в незрелых клубнях картофеля и снижалось по мере созревания (Kotikova et al., 2007; Konings et al., 2001). Рейес с коллегами отметили, что содержание антоцианов и общих фенольных веществ в клубнях снижалось по мере роста и созревания клубней, но общий урожай этих соединений на гектар увеличивался в течение всего времени, как и отметили значительное влияние местоположения на содержание антоцианов и общих фенольных веществ. Содержание антоцианов и общих фенольных веществ в клубнях картофеля повышалось, когда клубни выращивались в местности с более прохладной температурой и более длинными днями с более высокой солнечной радиацией. В таких условиях содержание антоцианов и общих фенольных веществ было выше в 2,5 и 1,4 раза, соответственно. Оказывается, температура во время роста растений может влиять на содержание фитохимических веществ (Reyes et al., 2004).

Картофель не отличается высоким содержанием фолатов, но является одним из основных источников фолатов из-за высокого суммарного потребления людьми, обеспечивая около 10 % от потребности (Navarre et al., 2009). Концентрация фолатов в картофеле колеблется между 12 и 37 мкг /100 г сырой массы, более чем в 70 сортах картофеля, диких видах и высокоразвитых гибридах (Konings et al., 2001). Также сообщалось, что картофель с желтой мякотью является богатым источником фолатов (Goyer, Navarre, 2007).

Лютейн, виолаксантин, зеаксантин и неоксантин являются основными каротиноидами, присутствующими в картофеле, а β -каротин присутствует в незначительных количествах (DellaPenna, Pogson, 2006). Оранжевый и желтый цвет мякоти клубней обусловлен зеаксантином и лютейном, соответственно. Сорта картофеля с белой мякотью содержат меньше каротиноидов по сравнению с сортами с желтой или оранжевой мякотью. Общее содержание каротиноидов в сортах картофеля с белой и желтой

мякотью составляет 50-350 мкг/100 г и 800-2000 мкг/100 г сырой массы, соответственно (Brown, 2008).

1.2.1. Методы определения антиоксидантной активности

Существует большое количество методов определения антиоксидантной способности продуктов питания и напитков, которые основаны на разных принципах утилизации супероксидных радикалов – Oxygen Radical Absorbance Capacity (ORAC). Анализы обычно бывают двух типов; перенос атома водорода (HAT - Hydrogen Atom Transfer) и перенос одного электрона (SET – sing electron transfer) (Adetuyi et al., 2018). Анализы HAT основаны на кинетике, в то время как SET-анализы измеряют антиоксидантную способность, как функции изменения цвета при уменьшении окислителя.

Суммарная антиоксидантная активность по улавливанию радикалов - Total Radical trapping Antioxidant Power (TRAP); антиоксидантная сила за счет восстановления железа Fe(III) - Antioxidant Power Ferric Reducing, (FRAP), а также восстановления меди Cu(II), CUPRAC; поглощение гидроксильных радикалов (анализ на содержание дезоксирибозы); поглощение органических радикалов (2,2-азино-бис(3-этилбенз-тиазолин-6-сульфоновая кислота, ABTS; 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил, DPPH); количественная оценка продуктов, образующихся при пероксидном окислении липидов (тиобарбитуровые кислото-реактивные вещества (LDLS); окисление липопротеинов низкой плотности (ЛПНП) и т. д. (Perez-Jimenes, Calixto, 2008).

Наиболее широко используемые процедуры измерения антиоксидантной способности: FRAP, ABTS, TEAC (Trolox equivalent antioxidant capacity - эквивалентная антиоксидантная способность Тролокса), и ORAC (Perez-Jimenes et al., 2008). Это означает, что сравнивать между собой значения, сообщенные разными лабораториями, может быть довольно сложно. Наиболее часто используемые названия метода DPPH – это способность по улавливанию свободных радикалов или антиоксидантная

активность. Существенные различия заключаются в подготовке проб, условиях экстракции антиоксидантов: растворитель, температура, оценка методов определения активности по улавливанию свободных радикалов с помощью DPPH и т.д. Так сравнительное исследование разных растворителей для экстракции (гексан, хлороформ, этанол, метанол) показало преимущество по количеству извлекаемых антиоксидантов для последнего (Adetuyi,2018). В данной диссертационной работе мы использовали для определения антиоксидантной активности метод TEAC (для гуминовых препаратов) и DPPH (для определения антиоксидантной активности картофеля).

В картофеле были исследованы содержание антиоксидантов и антиоксидантная способность как гидрофильных, так и липофильных антиоксидантных экстрактов из четырех сортов «раннего картофеля». Установлены значительные различия по содержанию каротиноидов и слабые различия по концентрации аскорбиновой кислоты у исследованных сортов. Также была проанализирована способность к улавливанию оксирадикалов (TOSC) метанол/водных и PBS-экстрактов (фосфатный буфер) кожуры и целого картофеля в отношении пероксильных радикалов АФК, пероксинитрита и гидроксильных радикалов. Установлена высокозначимая линейная корреляция ($R^2 = 0,9613$) между общей антиоксидантной способностью (в виде суммы пероксильных радикалов + пероксинитрит) и общим содержанием фенолов в метанол/водных экстрактах. Эти данные могут быть полезны для характеристики клубней «раннего картофеля» (в нашем исследовании объектом изучения был картофель сорта Удача, который относится к раннему). Это позволяет предположить, что эта культура потенциально может служить диетическим источником антиоксидантов (Leone et al.,2008).

Одним из перспективных способов борьбы с "окислительным стрессом" картофеля является применение различных удобрений, в частности, гуминовых веществ (ГВ).

1.2.2. Антиоксидантная активность растений и гуминовые вещества

ГВ оказывают благоприятное влияние на физиологию растений, улучшая структуру и плодородие почвы, а также оказывая влияние на поглощение питательных веществ и архитектуру корней (Trevisan et al., 2010). Фракции гуминовых кислот напрямую взаимодействуют с корневыми структурами. Исследования гуминовых веществ, меченых изотопами ^{14}C , показали, что эти гуминовые фракции в большем количестве связываются с клеточной стенкой в течение первых часов взаимодействия гуминовых веществ с корнем (3 ч.), а в дальнейшем (18 ч.) входят в состав растворимого компонента клеток (Berbara, García, 2013). Большинство гуминовых веществ прочно связываются со стенками клеток растений и могут поглощаться корнями, откуда некоторые из них (с низкой молекулярной массой) могут передаваться побегам (Nardi, Pizzeghello, 2002). Такое прямое поглощение позволяет гуминовым веществам оказывать прямое воздействие на метаболизм растений (Nardi et al., 2009). Специфическое физиологическое воздействие гуминовых веществ на растения зависит от источника, концентрации и молекулярной массы вносимых гуминовых фракций (Trevisan et al., 2010).

Так, гуминовые кислоты оказывают на растения ауксиноподобное действие, и этот первичный эффект был назван основным биологическим фактором, обуславливающим разнообразное благоприятное воздействие на растения. Например, усиление развития боковых корней под действием гуминовых веществ связано с механизмами деления клеток, находящимися под контролем ауксина.

В исследовании кукурузы (Canellas et al., 2009) было показано, что гуминовые кислоты повышают активность АТФазы в клетках корня и вызывают увеличение площади корней, в то время как другие кислоты увеличивают плотность корней. Эти результаты были интерпретированы как предполагающие, что гидрофобные взаимодействия гуминовых кислот в

ризосфере могут высвобождать ауксин-подобные соединения, которые способствуют росту корней.

1.3. Крахмал картофеля, его применение и физиологические свойства

Крахмал – основной углевод в картофеле и представляет собой важный сельскохозяйственный продукт, имеющий множество пищевых и непищевых применений (Ellis et al., 1998).

Картофельный крахмал имеет гранулы самого большого размера среди всех известных соединений этого класса. Их размер варьирует от 5 до 150 мкм (Seidemann, 1966; Jane et al., 1994) При этом, данная макромолекула состоит из двух типов молекул: амилопектина (77-81%) и амилозы (19-23%) (Павловская, 2012).

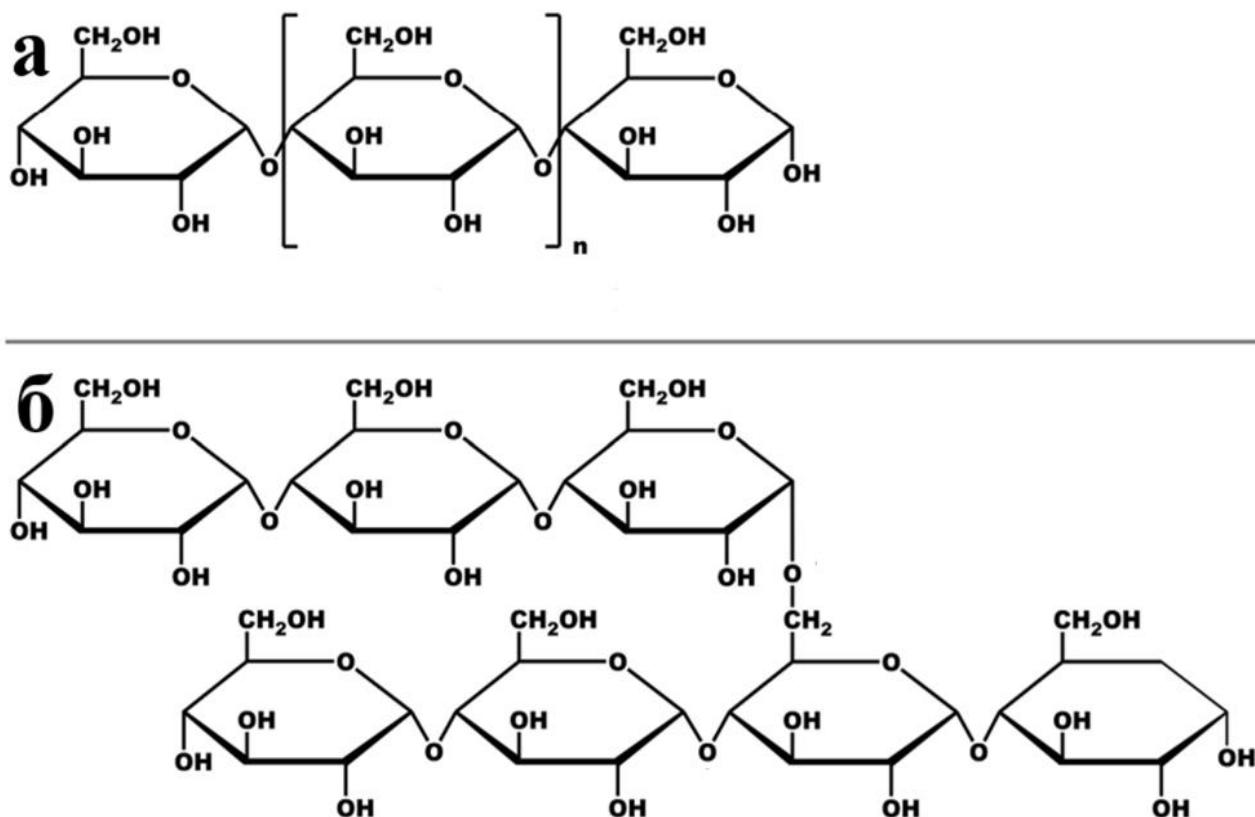


Рисунок 3. Молекулярная структура амилозы (а) и амилопектин (б).

Амилоза (рис. 3, а) в основном представляет собой линейный полимер из 14 связанных α -D-глюкозных единиц, но иногда встречаются амилоза с небольшим количеством короткоцепочечных разветвлений. Амилопектин, в

свою очередь, представляет разветвленный полимер из α -D-глюкозных единиц. Эти единицы внутри цепей соединены 14 связями, а в местах разветвления доходит до 16 связей. Молекулярная масса амилозы достигает до 6000 единиц ангидроглюкозы для картофельного крахмала., а для амилопектина может достигать до 3 000 000 000 единиц (рис.3, б).

Также стоит отметить, что в клубневом крахмале, в частности в амилопектине, содержится связанный органический фосфор. Некоторые 6-CH₂OH-группы боковой цепи -D-глюкозы этерифицируют фосфорную кислоту. Различные источники сообщают о разной плотности локализации таких групп. В среднем их количество составляет одну эфирную группу на каждые 8-12 единиц -D-глюкозы в наружных ветвях.

При этом, в состав крахмала могут входить также другие элементы или молекулы, обеспечивающие его свойства – так, например, с амилопектином крахмала могут быть связаны фосфатные группы моноэфира, что может способствовать разворачиванию скрученной структуры крахмала и повышению вязкости и загущающих способностей крахмала (Ягофаров, 2012).

С точки зрения перевариваемости крахмал можно удобно разделить на три категории в зависимости от его склонности к гидролизу пищеварительными ферментами. Это быстро перевариваемый крахмал (RDS - Rapidly Digestible Starch - гидролизуется в течение 20 минут), медленно перевариваемый крахмал (SDS - Safety Data Sheet, гидролизуется между 20 и 120 минутами) и резистентный крахмал (RS Resistant Starch- это тип крахмала, который не переваривается в тонком кишечнике и попадает в толстый кишечник, где ферментируется полезными бактериями, не гидролизуется в течение 120 минут) (Englyst et al., 1992). RDS принято считать наименее полезной для здоровья фракцией – он быстро гидролизируется, приводя к повышению уровня глюкозы и инсулина в крови. В картофеле уровень RDS после варки может достигать 53-86 % (Englyst et al., 1992; Dupuis et al., 2016), но этот показатель значительно варьирует в зависимости от способа

приготовления. SDS переваривается примерно за то время, которое требуется для прохождения пищи по тонкому кишечнику. В результате такого медленного переваривания SDS обеспечивает устойчивую энергию и помогает контролировать уровень глюкозы и инсулина в крови даже в продуктах с высоким общим гликемическим индексом (Eelderink et al., 2012). Содержание SDS в вареном картофеле колеблется от примерно 10%. Продукты с высоким содержанием SDS более приятны на вкус (Englyst et al., 1992). Наконец, RS крахмал – это фракция клетчатки на основе крахмала, устойчивая к амилазе, проходящая до толстого кишечника. При варке содержание RS крахмал снижается примерно до 5-10 % (Englyst et al., 1992); однако часть RS крахмала может быть восстановлена в период охлаждения (например, варка картофеля с последующим охлаждением) (Dupuis et al., 2016). Предполагается, что в толстом кишечнике RS крахмал играет роль пробиотика, питательного субстрата для нормальной микробиоты). В частности, RS является предпочтительным субстратом для *Ruminococcus bromii* (Ze et al., 2012), хотя также было отмечено его влияние на лактобактерии и бифидобактерии (Le Blay et al., 2003; Rodriguez-Cabezas et al., 2010). Эти и другие полезные анаэробные микроорганизмы ферментируют RS и выделяют короткоцепочечные жирные кислоты (уксусную, пропионовую и масляную), которые оказывают положительное влияние на колоноциты и здоровье толстой кишки (Emenaker, Basson, 1998; Emenaker et al., 2001; Conlon et al., 2012; Den Besten et al. 2013). Однако для того, чтобы ощутить физиологические преимущества резистентного крахмала, необходимо потребление 20 г/сутки, что может быть непросто, поскольку многие операции по переработке значительно снижают его содержание (Ashwar et al., 2015). Одной из наших задач являлось изучение влияние ГП на содержание резистентного крахмала картофеля.

1.4. Влияние гуминовых препаратов на физиологические свойства, в частности, крахмал и антиоксидантную активность картофеля

В последние десятилетия были предложены устойчивые альтернативы неизбирательному использованию синтетических агрохимикатов, таких как минеральные удобрения и пестициды (Rouphael, Colla, 2020). Перспективы увеличения использования их органических аналогов в сельском хозяйстве по всему миру составляют порядка 12 % в год (Calvo et al., 2014). При этом польза для здоровья, связанная с органическими продуктами питания, остается в центре внимания для исследований и производства (Hajšlová et al. 2005; Heaton, 2001). Соответственно, использование препаратов на основе органических соединений и включающих в себя различные биологические добавки – один из современных трендов сельского хозяйства (Bulgari et al., 2015), позволяющая снизить техногенную, особенно химическую, нагрузку на агроландшафт (Сутягин, 2007). Применение нетрадиционных органических удобрений позволяет не только уменьшить внесение минеральных удобрений, при сохранении или увеличение качества и количества урожая, но и улучшить здоровье почвы (Rockström et al, 2017; Щегорец, 2007). Однако, для рационального использования подобных препаратов, в связи с их разнообразием, необходимо проводить множество исследований, в том числе и на посадках картофеля (Безуглова, Полиенко, 2011; Hassan et al., 2024). В нескольких литературных обзорах указывается, что картофель, выращенный с использованием органических методов, полезнее для здоровья, чем картофель, полученный с использованием традиционных методов. Органический картофель содержит меньше нитратов (Boligłowa and Gleń, 2003; Erhart et al., 2005; Lairon, 2009) по сравнению с картофелем, выращенным традиционным способом. Аналогичным образом, увеличение сухого вещества (Rembiałkowska, 1999; Moschella et al., 2005), витамина С (Hajšlová et al., 2005), фенольных соединений (Hamouz et al., 2005; Rytel et al 2014), общего количества аминокислот (Maggio et al., 2008), общего белка (Camin et al., 2007; Maggio et al., 2008), общее количество сахаров и

минеральных элементов (Wszelaki et al., 2005; Hajšlová et al., 2005; Rembiałkowska, 2007) были отмечены для органического картофеля по сравнению с обычным картофелем.

Мы уже акцентировали внимание на препаратах, содержащих ГВ, и в этой главе рассмотрим их более подробно. Препараты с содержанием ГВ относятся к группе материалов, способствующих росту растений, так называемых биостимуляторов, которые повышают эффективность питания, устойчивость к водному стрессу и качество сельскохозяйственной продукции (Jardin, 2015, Martins, Soratto, Fernandes, 2020).

В состав препаратов с ГВ могут входить такие биологически активные группы, как: хиноны, фенолы и карбоновые кислоты (Melo et al., 2016; Якименко, Терехова, 2011). Эти группы обладают физиологической активностью для растений. Хиноны в гуминовых кислотах ответственны за ингибирование АФК (Calvo et al., 2014; Suzuki et al., 2012; Cordeiro et al., 2011; García et al., 2012), которые обладают фунгицидными (Siddiqui et al., 2009) и бактерицидными (Hassett, Bise, Hartenstein, 1987; Fujimura, Katayama, Kuwatsuka, 1994) свойствами. Фенолы и карбоновые кислоты депротонируют (ОН/ООН) в нейтральных и щелочных средах и отвечают за антиоксидантные функции ГВ, благодаря их способности поглощать свободные радикалы (Melo et al. 2016; Cordeiro et al., 2011; Куликова, 2008). Кроме того, показано, что препараты ГВ способствуют поглощению макро- (Bezuglova et al., 2017) и микроэлементов (Chen, Stevenson, 1986), росту и развитию растений (Nardi, Pizzeghello, 2002), повышению их устойчивости к абиотическим и биотическим стрессам (Куликова, 2008), при этом наблюдается оптимизация агрохимических свойств почв за счет экссудатов сельскохозяйственных культур (Calvo et al., 2014; Безуглова, Полиенко, 2011). Органически выращенные продукты питания привлекательны как для научных кругов (Hajšlová et al. 2005). Польза для здоровья, связанная с органическими продуктами питания, остается в центре внимания для исследований и

производства (Heaton, 2001). Для картофеля польза для здоровья, связанная с органическим производством, остается спорным вопросом.

Рассмотрим подробнее влияние препаратов ГВ на антиоксидантную активность растительных организмов. Уровень свободных радикалов является нестабильным и непостоянным, даже несмотря на способность ингибиовать данные процессы. Активность АФК возрастает в стрессовых условиях, независимо от природы стресса, который называется "окислительным стрессом" (Полесская, 2007; Алёхин и др., 2005). В таких случаях необходимо повышать устойчивость растений извне.

Известно, что антиоксидантными свойствами обладают вещества, способные ингибиовать процессы окисления в организмах, тем самым воздействуя на свободные радикалы (Смирнова и др., 2010). Вещества, проявляющие подобные свойства, принято разделять на две большие группы:

1. Соединения ферментной природы, такие как каталазы и пероксидазы.
2. Вещества неферментной природы, к которым относятся такие соединения, как аскорбиновая кислота, полифенолы, танины (Bravo 1998; Шарова, 2016; Кляйн, 2012.).

Показано также, что некоторые гуминовые соединения, извлеченные из зеленых компостов, проявляют антиоксидантную активность и наиболее значительную антимикробную способность в отношении некоторых грамположительных бактериальных штаммов, таких как *Staphylococcus aureus* и *Enterococcus faecalis*. Кроме того, ГВ способствовали значительному увеличению как корня, так и эпикотилей в экспериментах по прорастанию семян. Биологическая активность ГВ связана не только с их специфическим молекулярным составом, но и с конформационной стабильностью их супраструктур. В частности, наибольшие биоактивные и антимикробные свойства связаны с увеличенным содержанием гидрофобных ароматических и фенольных компонентов и более жестким конформационным расположением, что, в свою очередь, связано с небольшой степенью

фрагментации лигниновых структур. Сделан вывод, что ГВ могут использоваться в качестве субстрата для производства новых материалов не только для повышения продуктивности растений, но и для медицинских целей (Verrillo et al., 2022).

В свою очередь, применение ГП при выращивании картофеля, по ряду исследований, способствует не только получению более высоких урожаев (Безуглова, Полиенко, 2011; Lazzarini et al, 2022), вплоть до повышения урожайности на 46,6% (Балабко и др., 2010.), но и улучшению качества самих клубней картофеля. Так, в ряде исследований, при применении ГП в клубнях наблюдалось снижение количества нитратов, повышалось содержание крахмала и витамина С (Лукьянова, Верховцева, 2019).

Продемонстрировано, что ГВ могут использоваться в качестве ризосферных биостимуляторов биохимической активности сельскохозяйственных культур благодаря своим биоактивным молекулярным характеристикам (Bernstein et al., 2019; Canellas, Olivares, 2014; Monda et al., 2017; Monda et al., 2018). Исследования постепенно стали фокусироваться не только на косвенном и прямом влиянии ГВ на рост растений, но также на их влиянии на модуляцию биоконтроля микробной активности (Canellas, Olivares, 2017; da Piedade et al., 2017; Huang et al., 2020). Несмотря на их молекулярную конформационную сложность, ГВ также стали применяться в качестве исходного материала при синтезе специализированной промышленной продукции в качестве медицинских препаратов (Yalman, Laçin, 2019; Zhernov et al., 2021), которые также обладают иммуномодулирующими и антикоагулянтными свойствами (Klöcking, Helbig, 2005). В обзоре Безугловой О. и Клименко А. рассматриваются разные аспекты использования ГП (Bezuglova, Klimenko, 2022) и их воздействие на ценоз почвенных микроорганизмов и растений, а также в животноводстве как кормовых добавок. Однако, делается вывод, что в каждом конкретном случае необходимы дополнительные исследования для уточнения дозы и условий применения.

Помимо этого, применение гуминовых веществ в условиях средней полосы Российской Федерации, вне зависимости от региона, может привести к образованию микробной устойчивой корневой ассоциации, способствующей расщеплению трудноокисляемых полимерных соединений почв. В условиях повышенной влажности в микробном сообществе ризосферной зоны может начать преобладать анаэробный *Propionobacterium jensenii* (Лукьянова, Верховцева, 2019), который способен взаимодействовать с ГК, как с донорами водорода для своего анаэробного метаболизма, извлекая при этом из них азот (Benz et al., 1998).

1.5. Заключение по обзору литературы

Картофель – одна из наиболее распространённых во всём мире сельскохозяйственных культур, потребляемый ежедневно миллионами людей во всем мире. Однако, как при его выращивании, так и потреблении могут возникнуть различные трудности.

Известно, что несбалансированность в питательном режиме растений, создавая стрессовые состояния организмов, снижает урожай и ухудшает его качество. До сих пор сообщалось, что K^+ играет ключевую защитную роль в различных абиотических стрессах, таких как засуха, холод, водный стресс и т. д. Однако точный механизм и взаимодействие этих различных регуляций абиотического стресса с помощью K^+ полностью не изучены и требуют дальнейших функциональных исследований. Углубленное понимание компонентов, участвующих в распознавании, транспортировке и гомеостазе K^+ , позволит агрохимикам и физиологам растений в ближайшем будущем разработать методики выращивания культур, способствующих повышению устойчивости к абиотическим стрессам за счет повышения антиоксидантных свойств растений.

Один из способов влияния на устойчивость к абиотическим стрессам – применение ГП, оказывающих влияние на урожайность сельскохозяйственных культур и, в частности картофеля, повышая не только объем урожая, но и общее его качество. ГП способствуют улучшению

физиологических процессов, что может привести к увеличению содержания крахмала и усилинию антиоксидантной активности в картофеле.

Таким образом, как углубление понимания роли классических макроэлементов в питании растений и формировании их качества, так и разностороннее изучение природных органических соединений и их роли в повышении антистрессовых способностей для растений – тренды для дальнейших задач исследований, на которых было сосредоточено наше внимание в данной диссертационной работе.

Глава 2. Объекты и методы исследования

2.1. Метод закладки полевого опыта

Производственный полевой опыт с картофелем был заложен на базе учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ «Чашниково» в 2019, 2021 и 2022 году (рис. п. 1, 2, 3). Предшественником в 2018 году был незанятый пар, после чего с 2019 по 2022 на поле выращивался картофель. Расположение вариантов делянок, за исключением 1-ого ряда, рандомизированное.

Схема полевого опыта:

- 1 – контроль, фон – N32P32K32 (в графиках и таблицах 1NPK);
- 2 – фон + N32P32K32 (в графиках и таблицах 2NPK);
- 3 – фон + N32P32K32+K32 (в графиках и таблицах 2NPK + K);
- 4 – фон + 3 л/га препарата Грин-ПИКъ Гумистар универсальный - ГПГУ (в графиках и таблицах 1NPK + Гумистар);
- 5 – фон + N32P32K32 +3 л/га ГПГУ (в графиках и таблицах 2NPK + Гумистар).

В 2021 и 2022 году было добавлено ещё два варианта:

- 6 – фон + 3 л/га препарата БИО комплекс БИО гумат - БКБГ (в графиках и таблицах 1NPK + БиоГумат);
- 7 – фон + N32P32K32 +3 л/га БКБГ (в графиках и таблицах 2NPK + БиоГумат).

Посадку проводили в конце второй декады мая, уборку в первой декаде сентября. Перед посадкой клубни обрабатывали средствами защиты картофеля от проволочника (*Elateridae*). Каждая делянка была размером 6 м², 32 куста на каждую делянку. Дополнительный полив в течение вегетационного периода не осуществлялся.

Создание фона проводил владелец поля перед посадкой с использованием нитроаммоfosки производства «Акрон» с содержанием NPK в количестве 16%, в дозе N32P32K32, это же удобрение было использовано в нашем исследовании для вариантов с 2NPK. Дополнительное калийное

удобрение вносили в виде сульфата калия в день закладки полевого опыта. Оба удобрения заделывались в почву на глубину примерно 5 см.

Гуматы применяли дважды, по 1,5 л/га, разводя их в соответствии с рекомендациями производителя в 400 раз, и вносили их фолиарно, до полного смачивания листа в середине и в конце фазы цветения, в пик поглощения питательных веществ растением. Для следования принципу единственного различия на вариантах без гуматов использовали для обработки растений такой же объём воды в те же сроки.

Гумистар Универсальный фирмы Грин-ПИКъ производится из вермикомпоста, полученного после компостирования дождевыми червями *Eisinia fetida* «Владимирский старателъ». Состав, указанный на упаковке Гумистара: Гуминовые вещества не менее 2 г/л; N, не менее 1500 мг на 100 г абсолютно сухого вещества; P, не менее 1600 мг на 100 г абсолютно сухого вещества; K, не менее 2500 мг на 100 г абсолютно сухого вещества; в состав также входят Mg и Fe и микроэлементы как: Cu, Mn, B, Mo, Zn.

БиоГумат фирмы БиоКомплекс производится из бурого угля.

Состав, указанный на упаковке: гумат калия, калий фосфорнокислый, хелат магния (0,7%), хелат бора (0,7%), хелат меди (0,01%).

2.2.1. Учёт урожая и определение качественных показателей сырых клубней картофеля

Урожайность картофеля оценивалась поделяночно вручную. С каждой повторности варианта по окончанию полевого опыта были собраны клубни с 12 кустов растений. После уборки и взвешивания урожая было дополнительно посчитано количество клубней, полученное с каждой делянки.

Товарность клубней картофеля определялась вручную в соответствии с принятым в РФ ГОСТ Р 51808-2001 как для раннеспелого картофеля первого класса.

Фактическую окупаемость (ФО) удобрений на 1 кг д.в. определяли по формуле:

$$\text{ФО} = \text{ПУ}/\text{Н}, \text{ где}$$

ПУ – прибавка урожая, полученная за счет применения удобрений, кг;
Н – доза внесенных минеральных удобрений, кг д.в. /га (Мудрых, Алешин, 2011).

В сырой биомассе определяли содержание витамина С по методу Мурри (Минеев, 2001) и содержание нитратов ионометрически (Дурынина, Егоров, 1998). Далее образцы сырой биомассы фиксировали (10 минут при температуре 90 °С в термостате) и после высушивали до воздушно сухого состояния в термостате при 40 °С и использовали для дальнейших анализов.

2.2.2. Определение содержания веществ в зафиксированном картофеле

Полученные зафиксированные, высушенные и размолотые образцы клубней озоляли в серной кислоте по методу Гинзбург (Минеев, 2001).

В полученных вытяжках определяли содержание:

- Фосфора колориметрическим методом (Минеев, 2001);
- Калия пламенно-фотометрическим методом (Минеев, 2001);
- Общего азота с помощью метода отгона аммиака в аппарате микрокъельдаля (Минеев, 2001);
- Белкового азота по методу Плещкова (Минеев, 2001);

2.3. Определение общей антиоксидантной активности клубней

Антиоксидантную активность в сухих клубнях картофеля определяли по методу общего ДФПГ-теста (Mensor, 2001).

Навеска сухого картофеля массой в 1 г была гомогенизована в ступке, в которую приливали по 2 мл 96% этилового спирта, пока объём не дошёл до 6 мл. Далее раствор перенесли в флакон, промывая ступку ещё 4 мл спирта. Затем полученную вытяжку центрифугировали при 1500g в течение 15 минут. Во время центрифугирования подготавливается свежий раствор 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (ДФПГ) – 7,89 мг ХЧ ДФПГ растворялся с помощью магнитной мешалки в 100 мл 50% этилового спирта.

После центрифугирования подготавливали следующие пробы:

2 контрольные пробы, состоящие из 96% спирта, 2 мл и 1 мл ДФПГ;

Из каждой вытяжки готовили по 1 пробе следующего образца:

2 мл экстракта + 1 мл 50% спирта;

2 мл экстракта + 1 мл ДФПГ.

Полученные пробы оставляли на 30 минут при 21-23 градусах.

Далее измеряли оптическую плотность образцов, в первую очередь, с добавлением ДФПГ на колориметре при длине волны 517 нм, против 50% этанола.

Степень ингибирования ДФПГ (%) рассчитывали по формуле:

$$\text{ДФПГ \%} = (A_O - (A - A_b)/A_O) \times 100), \text{ где}$$

A – оптическая плотность экстракта с ДФПГ

A_O – Оптическая плотность ДФПГ без экстракта.

A_b – Оптическая плотность экстракта без ДФПГ

2.4. Фракционный состав крахмала картофеля

Фракционный состав картофеля определяли по запатентованному методу, разработанному в исследовательском центре картофеля имени А.Г. Лорха (Патент RU 2787051 C1). Способ реализуется следующим образом. Определяют массовую долю влаги по ГОСТ Р 55802-2013 и крахмала по ГОСТ 10845-98. Рассчитывают массу навески с учетом массовой доли сухих веществ.

Готовят 1% раствор, варят его при 100°C в течение 15 мин, проводят ферментативный гидролиз панкреатической α-амилазой (ПАА) и амилоглюкозидазой (АМГ) при 37°C в течение 4 часов, приливают 50% этиловый спирт для окончания процесса гидролиза, затем приливают 4% фосфорномolibденовой кислоты для осаждения белков (при массовой доле белка более 10%), центрифигируют при 4000 об/мин в течение 10 мин и фильтруют. Далее проводят определение углеводного состава, полученного гидролизата на высокоеффективном жидкостном хроматографе (ВЭЖХ). Расчет степени резистентности проводится по количественному содержанию глюкозы, которая образуется в результате ферментативного процесса и

пересчитывается на массовую долю крахмала, определяемого по ГОСТ 10845-98.

Вычисления проводят с точностью до первого десятичного знака, по формулам: $CP = (M_{cb} - M_r)/M_{cb} \times K$, где

CP – степень резистентности образца картофеля, %;

M_{cb} – масса испытуемого образца продукта по сухому веществу, отобранная для исследования, г;

M_r – масса глюкозы в надосадочной жидкости в пересчёте на 1 г испытуемого образца;

K – массовая доля крахмала, для пересчёта CP , %;

$M_r = (M_r \times \Gamma)/100 \times 0,9$, где

Γ – массовая доля глюкозы по показаниям ВЭЖК, %;

M_{cb} – масса навески испытуемого крахмала по сухому веществу, отобранная для проведения исследования, г;

100 – коэффициент пересчёта массовой доли глюкозы, %;

0,9 – коэффициент перевода количества глюкозы, в количество крахмала (по соотношению молекулярных масс ангидроглюкозного звена крахмала и глюкозы $162/180 = 0,9$)

2.5. Определение антиоксидантной активности гуминовых препаратов

Антиоксидантную активность определяли в институте биохимии им. А.Н. Баха, с помощью метода тестирования антиоксидантной активности *in vitro* по отношению к катион-радикалу 2,2-азино-бис3-этилбенз-тиазолин-6-сульфоновой кислоты (АБТС).

Катион-радикал АБТС получали по методу Re и соавторов, (Re, 1999. 1243) путем инкубации раствора, содержащего 7 мМ АБТС и 2.45 мМ пероксадисульфат калия, в темноте при комнатной температуре в течение 12 – 18 часов.

Полученный концентрированный раствор катион-радикала АБТС разводили 50 мМ фосфатно-солевым буфером (с 100 мМ хлорида натрия), pH

7,40 (ФСБ) до ОП₇₃₄=0,70±0,02, что соответствует конечной концентрации катион-радикала АБТС ≈ 47 мкМ.

Для определения антиоксидантной ёмкости (далее АОЕ) в лунки 96-луночных несорбирующих полистирольных микропланшетов с плоским дном вносили по 20 мкл исследуемых образцов или раствора тролокса и 180 мкл раствора катион-радикала АБТС. При определении АОЕ в качестве контроля использовали для 180 мкл раствора катион-радикала АБТС и 20 мкл 50 мМ фосфатно-солевого буфера (с 100 мМ хлорида натрия), pH 7,40.

Реакцию регистрировали по убыли ОП₇₃₄ в течение 40,5 мин с интервалом измерений каждые 60 с при температуре 25°C на фотометро-флуориметре "BioTek Synergy 2". Для каждой концентрации стандарта и исследуемого образца измерения проводились в 4 повторностях.

При построении калибровочной кривой зависимости убыли оптической плотности от концентрации тролокса, его концентрацию в реакционной среде варьировали в пределах 1 – 10 мкМ. По убыли оптической плотности реакционной среды в присутствии исследуемых соединений определяли эквивалентные концентрации антиоксидантов в пробе. АОЕ образцов выражали в мкМ эквивалентов Тролокса (ТЭ).

2.6. Агрохимические характеристики почвы

С каждой контрольной делянки отбирались почвенные пробы для агрохимического анализа, которые после смешивались в один общий образец.

В полученном образце определяли:

- Гумус по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91);
- Калий на пламенном фотометре (Минеев, 2001);
- Фосфор по методу Кирсанова (Минеев, 2001);
- pH KCl в смешанном почвенном образце определяли по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85);

- Hr в почвенном образце определяли по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91).

2.7. Метод оценки погодных условий

Метеорологические данные за 2019, 2021, 2022 год были получены с метеостанции, расположенной на территории учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ «Чашниково». Средние погодные условия получены по данным гидрометцентра России для данной территории.

Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова рассчитывался по следующей форме:

$$K = R \times 10 / \Sigma t, \text{ где}$$

R – сумма осадков в миллиметрах за вегетационный период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$;

Σt – сумма температур $^{\circ}\text{C}$ за вегетационный период.

2.8. Статистическая обработка

Полученные результаты исследований обрабатывали с помощью пакета Excel (погодные условия и $HCP_{0,05}$ для изучаемых параметров) и программы STATISTICA 10. В ходе статистической обработки были применены методы описательной статистики, такие как: двухфакторный дисперсионный анализ и параметрический корреляционный анализ данных. На рисунках дисперсионного анализа представлены среднеарифметические значения и их стандартные ошибки. По полученным в ходе дисперсионного анализа данным были рассчитаны показатели $HCP_{0,05}$. Результаты корреляционного анализа представлены в таблицах и на трехмерных тепловых графиках. Достоверность различий дисперсий проводили по F-тесту Фишера (с интервалом достоверности в 95%), корреляционных анализов по критерию Пирсона (с интервалами достоверности в 90, 95 и 99%). Для проверки нормальности распределения данных, а также выявлений закономерностей между годами исследования был применён метод главных компонент (МГК), а также проведён анализ с использованием четырёх наиболее влиятельных

компонент. К полученным результатам МГК был использован алгоритм итерационного метода с использованием частных наименьших квадратов (алгоритм NIPALS), для выявления вариантов с наибольшим влиянием.

Глава 3. Результаты и обсуждения²

3.1. Агрохимические показатели почвы

В ходе исследований были оценены агрохимические показатели почвы.

Таблица 1. Характеристики почвы участка за 3 года исследования

Показатель		За 3 года исследований
Органическое вещество, %		2,9±0,13
N МГ/КГ	NH ₄ ⁺	18,90±0,07
	NO ₃ ⁻	109,4±0,6
P ₂ O ₅ , мг/кг		434±6
K ₂ O, мг/кг		161,3±6,4
рНkcl		5,90±0,13

Полученные показатели (табл. 1) свидетельствуют об окультуренности дерново-подзолистой почвы. При этом стоит отметить хорошее обеспечение почвы фосфором и нормальное обеспечение калием, что объясняет невысокие

² Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в следующих научных статьях автора в журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова:

1. Кочетков И.М., Кубарев Е.Н. Эффективное применение гуминового препарата как способ повышения урожайности и качества картофеля (*Solanum tuberosum* L.) на фоне минеральных удобрений при выращивании на дерново-подзолистой почве // Проблемы агрохимии и экологии. – 2021. – № 2. – С. 29-33. DOI: 10.26178/4869.2021.36.46.005.

2. Верховцева Н.В., Лукьянова М.В., Кочетков И.М., Кубарев Е.Н. Оценка воздействия препаратов с физиологически активными свойствами на антиоксидантные свойства картофеля *Solanum tuberosum* L. (на примере аскорбиновой кислоты) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2023. – Т. 78, № 2. – С. 56-62. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-56-62. [Verkhovtseva N.V., Lukyanova M.V., Kochetkov I.M., Kubarev E. N. The Effect of Physiologically Active Preparations on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Antioxidant Properties Exemplified by Ascorbic Acid. // Moscow University Soil Science Bulletin – 2023 – Vol. 78 – №. 2 – pp. 122–128].

3. Кочетков И.М., Верховцева Н.В. Физиологический отклик растений картофеля (*Solanum tuberosum* L.) на фолиарные обработки гуминовыми препаратами при формировании урожая, его качественных показателей и антиоксидантной активности клубней // Проблемы агрохимии и экологии. – 2025 – № 2 – с. 4-12. DOI:10.26178/AE.2025.47.23.001.

дозы минеральных удобрений, применяемых на территории хозяйства и в ходе полевого опыта.

3.2. Антиоксидантная активность используемых ГП

Как свидетельствует описание производителей используемых ГП они значительно отличаются по происхождению и составу. Цель нашего исследования предполагала изучить только их антиоксидантные свойства. Поэтому первоначально было определена именно эта их активность по методу тестирования антиоксидантной активности *in vitro* по отношению к катион-радикалу АБТС.

Автором и его соавторами было установлено, что антиоксидантная активность неразведённого препарата Гумистар равнялась 1550 ± 50 мкМ ТЭ/л, в то время как для препарата БиоГумат это значение равнялось 2159 ± 35 мкМ ТЭ/л. Для почвенных гуминовых веществ характерны показатели по этому критерию от 4,38 до 26,57 (Re, 1999; Rimmer, 2006). Таким образом, показатели антиоксидантной активности ГП значительно превосходили действие схожих веществ в почве. Однако после учёта разведения, антиоксидантная активность Гумистара составляла $3,88 \pm 0,13$ мкМ ТЭ/л, а БиоГумата $5,39 \pm 0,09$, но с учетом того, что ГП применяли фолиарно, предполагали эффект от их применения, по крайней мере, в экстремальных условиях.

3.3. Метеорологические условия в вегетационные периоды

По полученным с метеостанции данным (рис. 4) были установлены следующие гидротермические коэффициенты (ГТК) увлажнения Селянинова, в соответствии с которыми вегетационные периоды выращивания картофеля были классифицированы следующим образом:

2019 = ГТК 0,762 – засушливый вегетационный период

2021 = ГТК 0,512 – засуха

2022 = ГТК 0,736 – засушливый вегетационный период

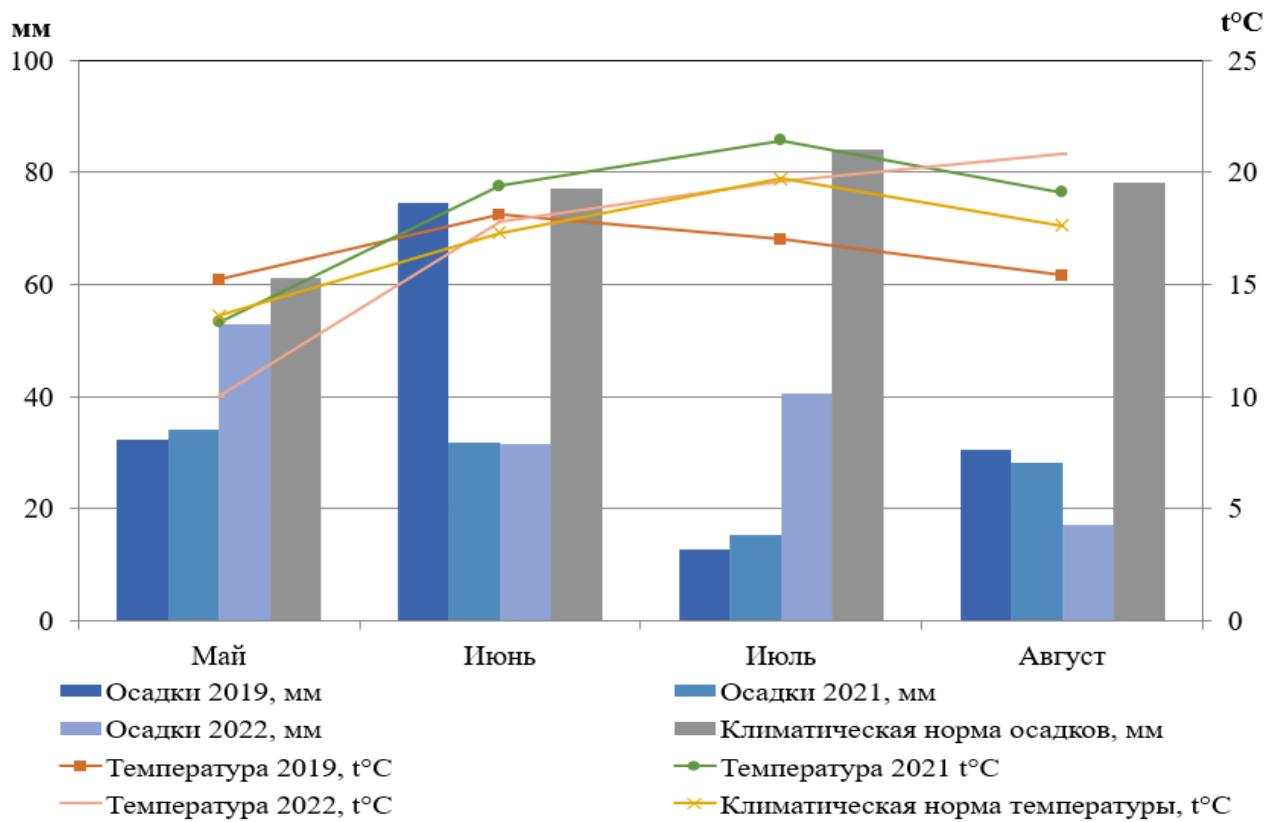


Рисунок 4. Погодные условия вегетационных периодов за 3 года экспериментальных исследований.

Во всех годы полевого опыта наблюдалась нехватка осадков, по сравнению с климатической нормой. При этом сумма активных температур, в целом, соответствовала зафиксированным нормам.

В 2019 году, несмотря на достаточное увлажнение в июне, в остальных месяцах наблюдалась нехватка осадков, больше всего проявившая себя в июле.

2021 год был наименее благоприятным и засушливым, что в целом соответствует данным «доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год», от РОСГИДРОМЕДА.

2022 год был более щадящим по сравнению с предыдущим – однако ни в один из месяцев на территории хозяйства не было зафиксировано выпадение нормы осадков. Единственный месяц, в котором количество осадков приблизилось к ожидаемой норме – это в мае, во время предпосевной обработки и посадки картофеля.

3.4. Урожайность картофеля, выход товарной продукции

Общепринятое мнение в агрохимических исследованиях состоит в том, что урожайность сельскохозяйственных культур является интегральным показателем исследований (Young, Ros, Vries, 2021), особенно в связи с вариабельностью погодных характеристик. С учетом изменений погодного режима в течение трех лет наблюдений нашего исследования рассмотрим этот совокупный показатель.

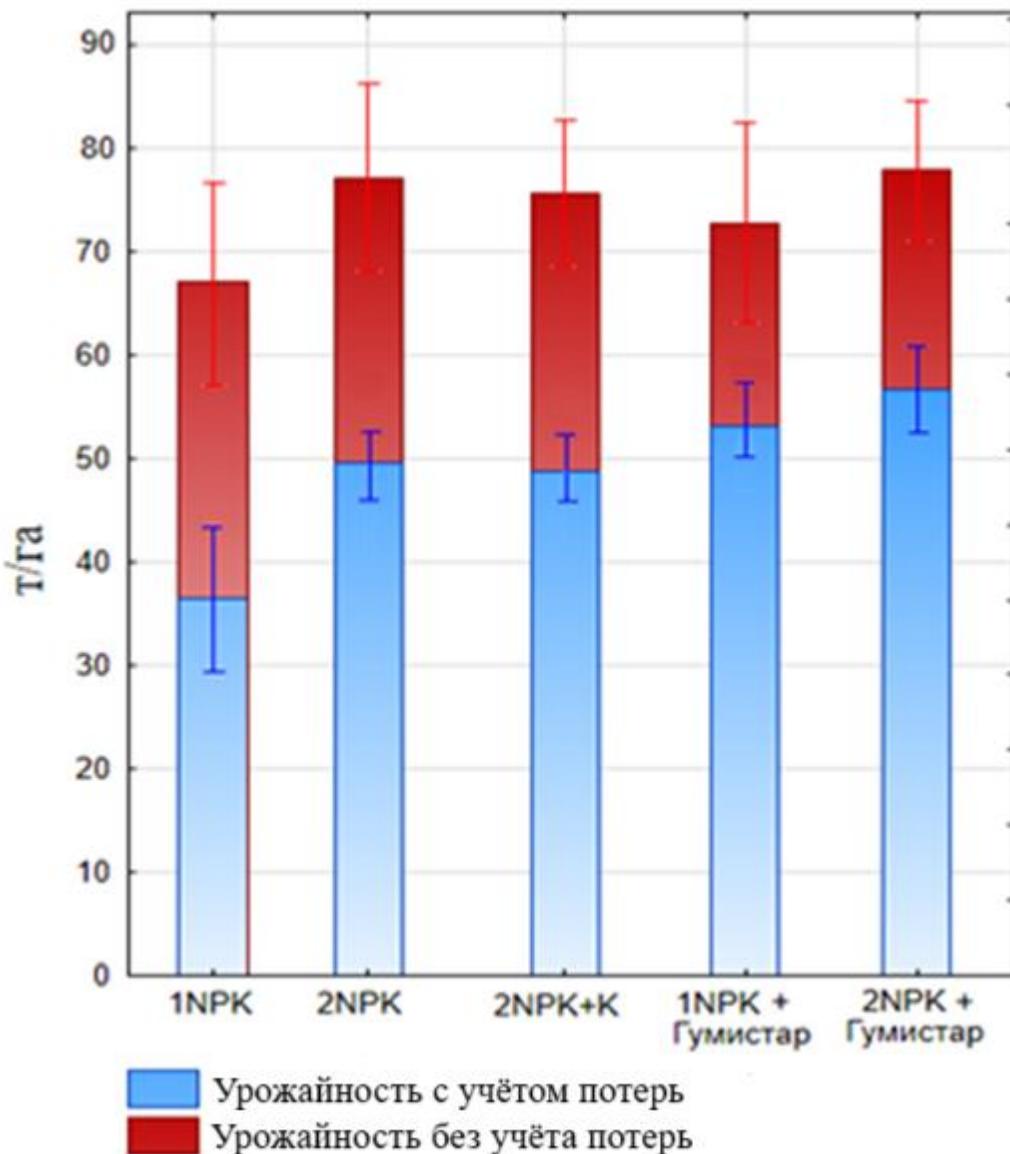


Рисунок 5. Данные по урожайности в 2019 году. Здесь и далее усики разброса отображают на графике стандартное отклонение.

Несмотря на недостаточное увлажнение, в 2019 вегетационном периоде (рис. 4) урожайность картофеля для хозяйства была богатой (рис. 5, табл. П.1.). Наибольший прирост урожайности обеспечили варианты 2NPK и 2NPK

+ Гумистар – 14,6 и 15,8 %, соответственно для общей урожайности и товарных клубней – эти варианты также достоверно различались от контроля по НСР_{0,05}. Стоит также выделить вариант 1NPK+Гумистар, который пусть и не обеспечил столь же высокого прироста нетоварного картофеля, но продемонстрировал значительное увеличение выхода товарной фракции продукции на 46,2%. Для этого же варианта с ГП наблюдалась и наиболее высокая ФО – она составляла максимум 58 и 175 кг/кг д.в. без учёта и с учётом потерь для варианта с 1NPK + Гумистар, соответственно (табл. П.1). Год был засушливый, но распределение осадков по месяцам и температуры в течение вегетационного периода (рис. 4), позволила получить более высокую урожайность в нашем исследовании.

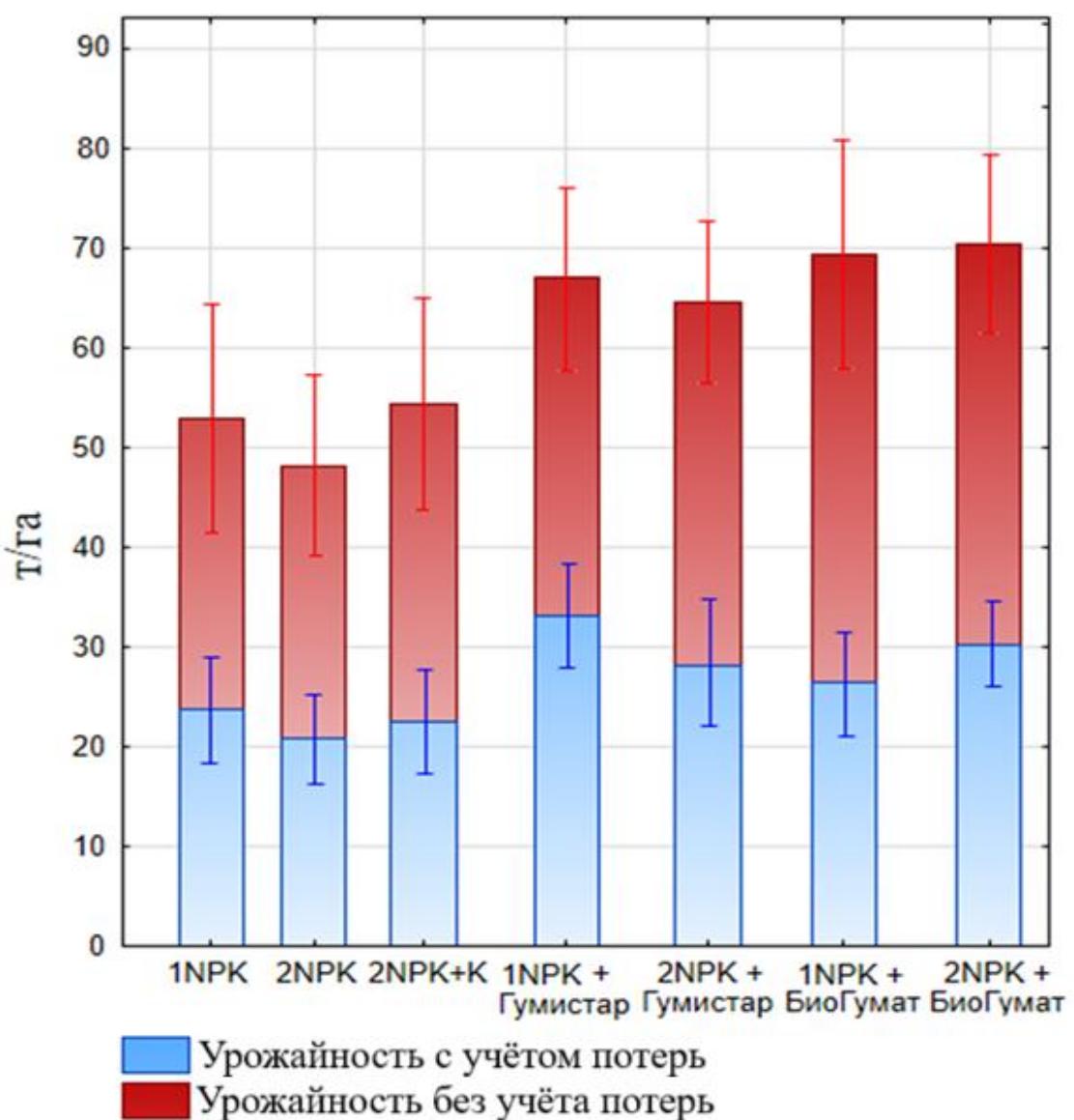


Рисунок 6. Данные по урожайности в 2021 году.

Следующий 2021 год (рис. 6) из-за погодных условий (засуха, рис. 4) был значительно скучнее – существенные потери в этот год пришлись на клубни нетоварного размера, хотя и в целом урожайность была низкой. Впрочем, даже в подобных условиях применение ГП способствовало выходу товарного картофеля, на фоне классических минеральных удобрений. Так, варианты с ГП (табл. П.2.) обеспечили прирост урожайности без учёта потерь от 20,3 до 30,9 % - при этом наибольшего значения достиг вариант с БиоГуматом на повышенном минеральном фоне. В тоже время, при анализе товарной части урожайности лучшие показатели наблюдались на варианте с использованием Гумистара на низком минеральном фоне – прирост урожайности достиг 39,7%, что значимо превосходило даже один вариант с использованием другого ГП. При этом также фиксировался рост ФО на фоне остальных вариантов для гуминовых препаратов. Наибольший показатель этого значения наблюдался у 1NPK+Гумистар в размере 139 и 98 для урожая без учёта и с учётом потерь, соответственно (табл. П.2.).

В 2022 (рис. 7, табл. П.3.) году, несмотря на схожие по ГТК с 2019 годом погодные условия, выход общего урожая схожего объёма и масса товарных клубней была значительно ниже. Предположительно, это может быть связано с распределением осадков в отдельные месяцы вегетационного периода по сравнению с 2019 годом. Так, в 2019 году, несмотря на достаточное увлажнение в июне, в дальнейшие месяцы вегетации осадков было недостаточно. В 2022 году осадков в июне было мало, а температура в августе существенно превышала климатическую норму, что подтвердило наше предположение. Несмотря на это варианты с использованием гуминовых препаратов показали себя лучше остальных.

Отдельно стоит выделить вариант на низком минеральном фоне с применением Гумистара, на котором урожайность была более высокая, как по общему сбору (+1,3 % относительно контроля), так и по выходу товарного картофеля (+19,4% относительно контроля), а также наблюдалась наибольшая ФО нитроаммоfosки – 5 и 33 кг/кг д.в (табл. П.3.). для общего и товарного

картофеля, соответственно. Препараты, полученные из разных органических субстратов, были близки по выходу товарного картофеля.

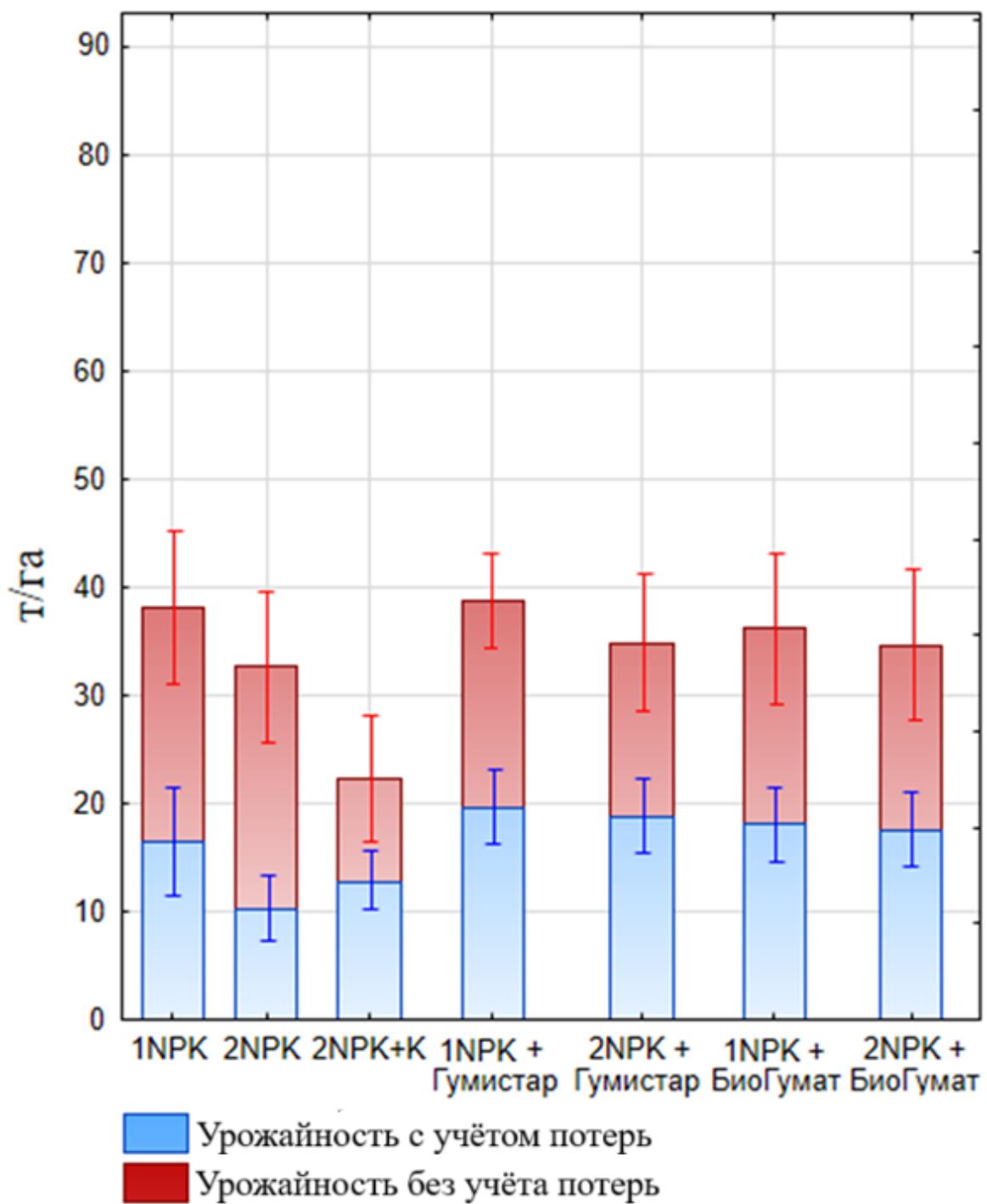


Рисунок 7. Данные по урожайности в 2022 году.

Таким образом, общим выводом по урожайности картофеля в соответствии с нашей целью исследования можно сформулировать следующим образом: «фолиарная обработка гуминовыми препаратами Гумистар Универсальный и БиоГумат на фоне минеральных удобрений достоверно повышала выход товарного картофеля в неблагоприятный

вегетационный период (засуха) для выращивания растений, а также повышала ФО применяемых вместе с этими препаратами минеральных удобрений.

Однако, в нашем исследовании, было важным разобраться как при этом менялось качество получаемой продукции, в особенности по таким малоизученным показателям как резистентный крахмал и антиоксидантная активность. Результаты, полученные при изучении качественных показателей клубней картофеля, представлены в следующих разделах нашей работы.

3.5. Содержание калия и фосфора в клубнях картофеля

Картофель относится к калиелюбивым растениям (Bian et al., 2022). Подробно на этой физиологической особенности культуры и связи с содержанием фосфора мы остановимся в разделе обсуждение результатов.

Калий, как поступающий в растения элемент питания, участвует в регулировании вязкости цитоплазмы, повышает водоудерживающую способность растения. Он принимает роль в осморегуляции, играя большую роль в процессе открывания и закрывание устьиц листа. В клубнях картофеля под влиянием калия увеличивается содержание крахмала (Никитишен, 2012).

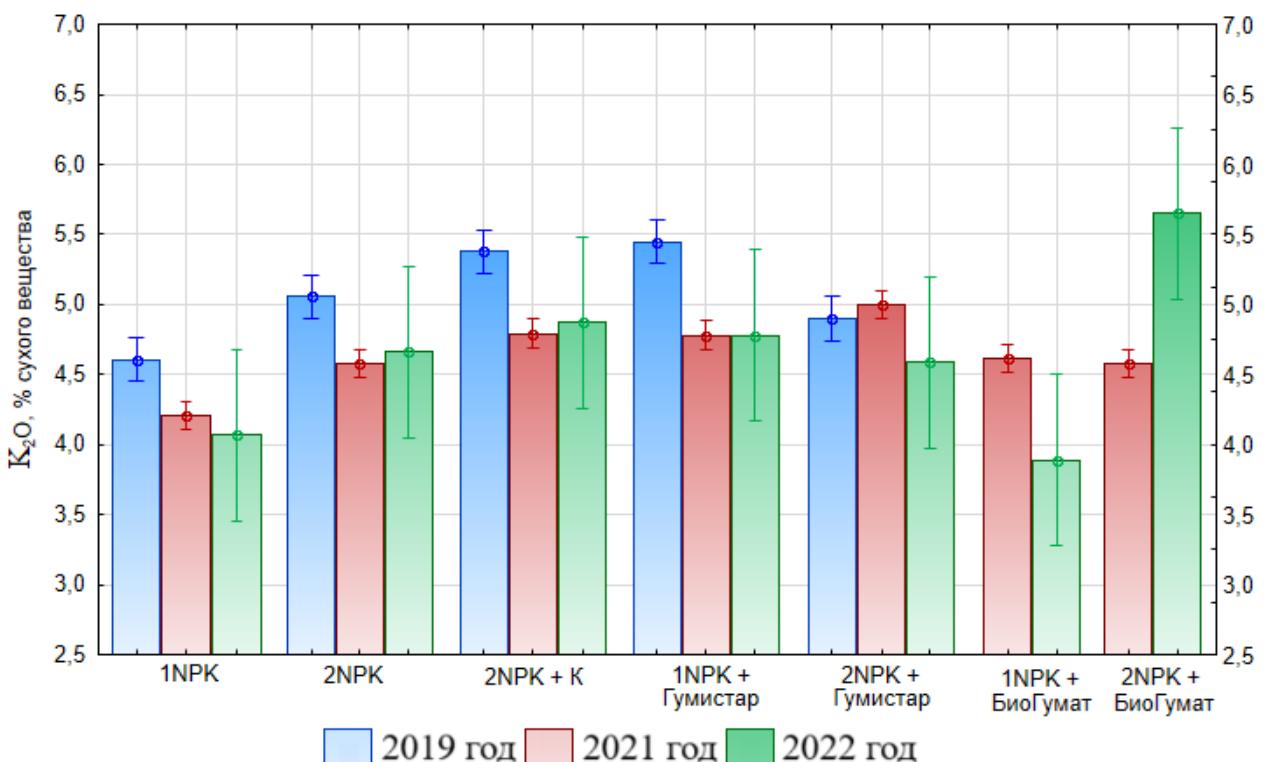


Рисунок 8. Содержание калия в клубнях картофеля.

Анализ полученных данных показал, что ГП на низком минеральном фоне могут давать прирост содержания калия в клубнях в том же объёме, что и повышенное внесение минеральных удобрений (рис. 8, табл. П.4). Более высокие значения содержания калия в картофеле были получены в самом большом урожае в 2019 году, когда было хорошее увлажнение в июне месяце.

Фосфор входит в состав таких важнейших компонентов, как нуклеиновые кислоты, фосфолипиды и фосфопротеиды, нуклеотиды, витамины. Также он является важной структурной единицей веществ, участвующих в энергетическом обмене (АТФ, НАД и др.) (Никитишен, 2012).

Эффект от применения гуминовых препаратов на содержание фосфора в клубнях был хотя и менее ярко выражен, но по отношению к картофелю, выращенному на низком уровне минерального питания (рис. 9, табл. П.4.), также был существенным. Наибольшие значения этого показателя так же, как и для содержания калия были определены в клубнях, полученных из повышенного урожая.

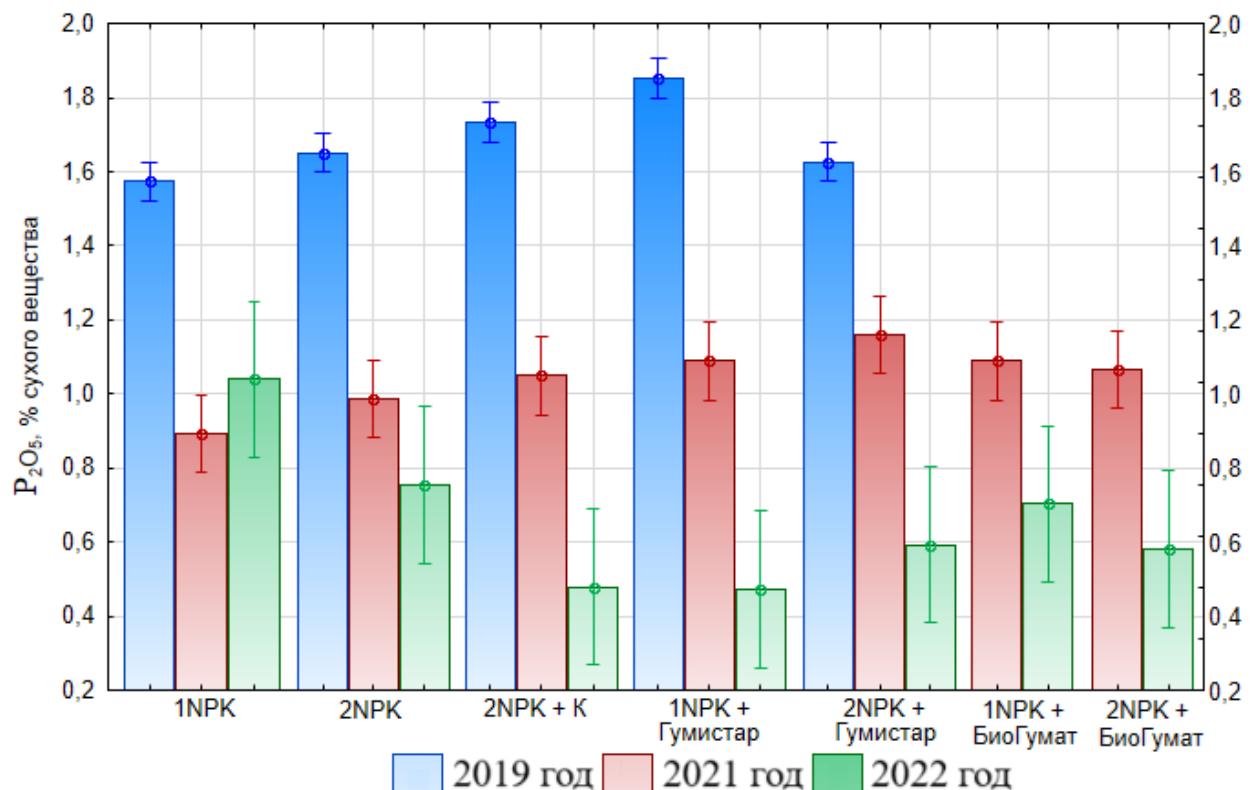


Рисунок 9. Содержание фосфора в клубнях картофеля.

3.6. Содержание азота

Азот – один из основных элементов питания растений, входящий в состав молекул белков, нуклеиновых кислот, витаминов и других жизненно необходимых для растений соединений. При его недостатке замедляется рост и развитие растений, нарушается энергетический обмен, снижается интенсивность фотосинтеза, и как следствие образование углеводов, в том числе крахмала (Никитишен, 2012).

В ходе анализа общего азота было установлено, что применение препарата Гумистар на низком минеральном фоне повышает его содержание значительнее всего (рис. 10, табл. П.5.).

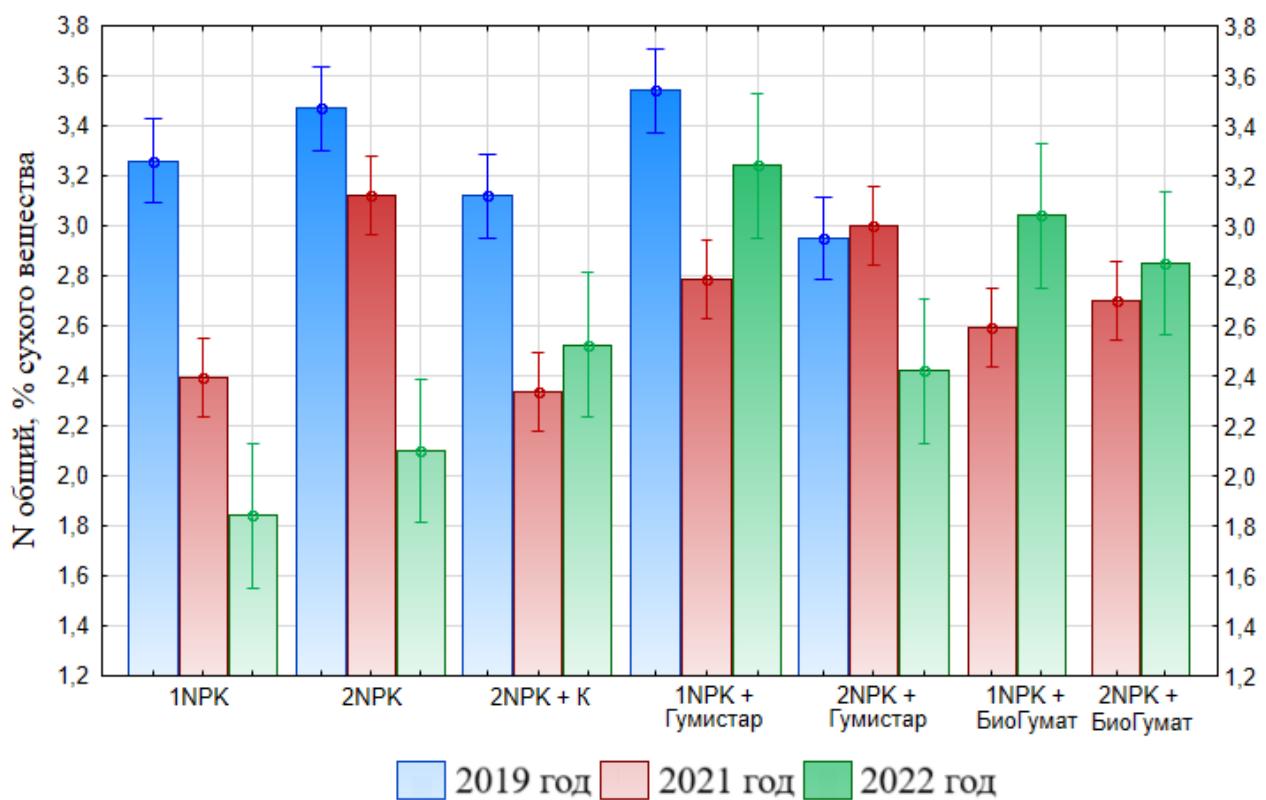


Рисунок 10. Содержание общего азота в клубнях картофеля.

Картофельный белок – пусть и редко оцениваемый, но интересный показатель для клубней ввиду своей структуры и ценности для человека. По своей структуре он схож с яичным белком и легко усваивается. На вариантах с применением гуминовых препаратов (рис. 11, табл. П.5.) наблюдалось повышение содержания этого показателя.

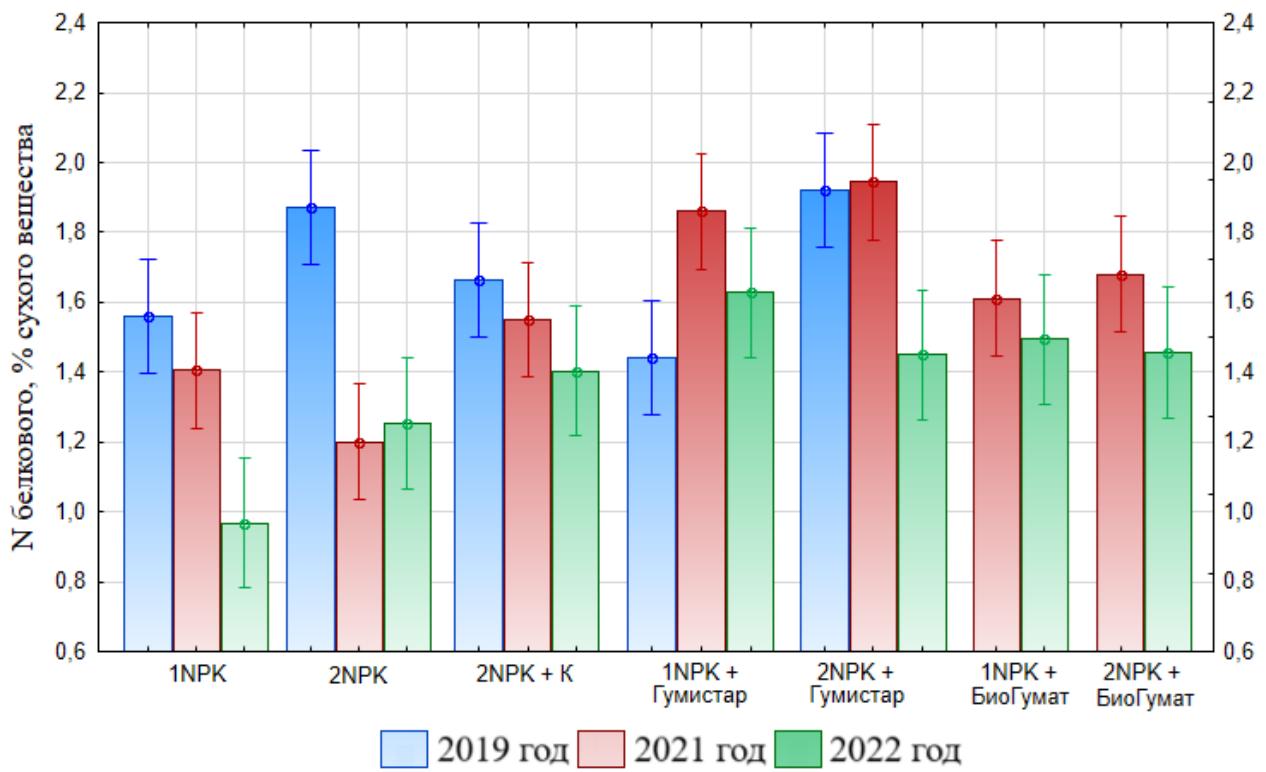


Рисунок 11. Содержание белкового азота в клубнях картофеля.

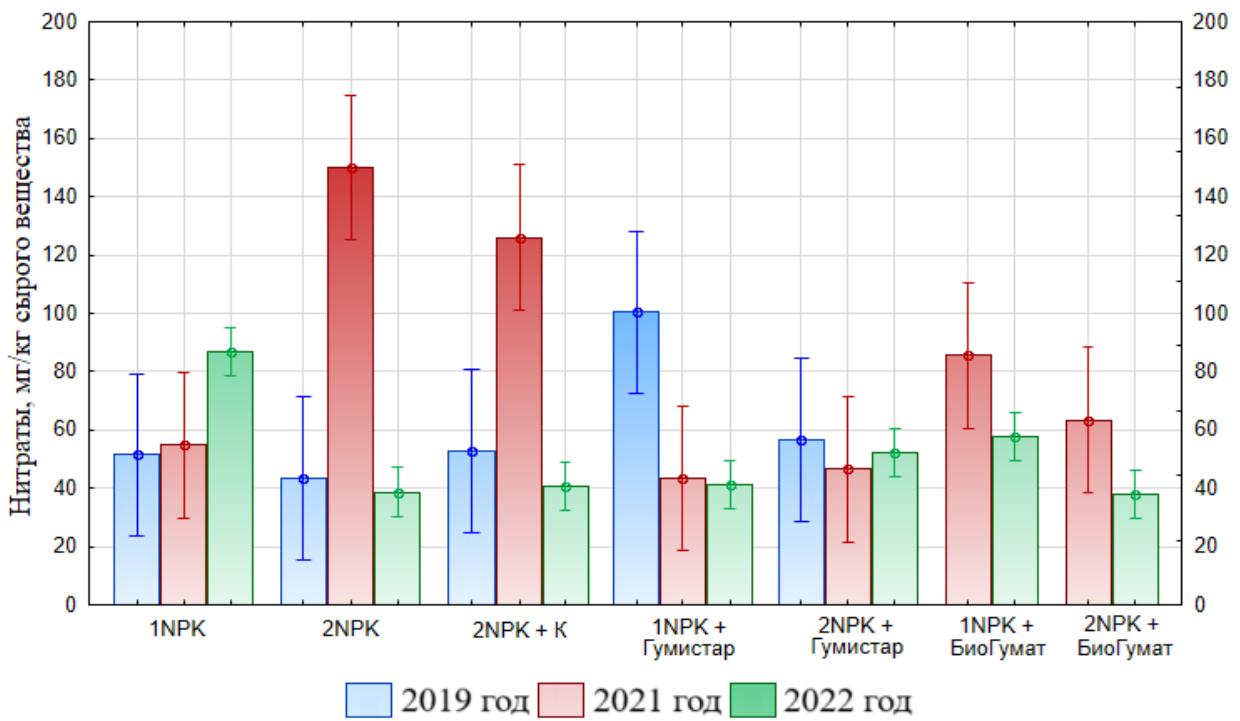


Рисунок 12. Содержание нитратов в клубнях картофеля.

Анализ содержания нитратов (рис. 12, табл. П.5.) показал, что все образцы соответствуют принятому ПДК по содержанию нитратов для картофеля (250 мг/кг). В первый год исследования наибольшее достоверное

содержание нитратов наблюдалось в клубнях, выращенных на варианте с Гумистаром на низком минеральном фоне, однако последующие года не подтвердили это наблюдение – наибольшее содержание в 2021 наблюдалось во вариантах с высоким минеральным фоном и дополнительным калием.

Стоит отметить, что при этом в опытных вариантах с ГП на высоком минеральном фоне повышенного содержания нитратов в клубнях не наблюдалось. Исходя из этого, можно сделать предположение о том, что применение ГП способствует метаболизму нитратов.

3.7. Содержание витамина С и антиоксидантная активность клубней

Чтобы глубже понять полученные результаты своих исследований, провели сравнение изменения содержания аскорбиновой кислоты (АСК) в клубнях картофеля при применении ГП на этом же экспериментальном поле. Результаты исследований ГП, проведенных в различные годы выращивания картофеля, свидетельствуют о том, что независимо от препарата оба ГП оказывали положительное влияние на содержание витамина С в культуре (рис. 13, табл. П.6.) по сравнению с контролем.

Особенно сильно данный эффект проявил себя в наименее благоприятном для картофеля 2021 году (засуха) – в клубнях картофеля, выращенных на вариантах с применением гуминовых препаратов, содержание витамина С было значительно выше. При этом содержание АСК на дерново-подзолистой почве также увеличивалась при использовании NPK. Следовательно, в биосинтезе витамина С, как защитного антиоксиданта, существует определенная взаимосвязанность процессов повышения его содержания.

Так, улучшение условий выращивания (режим питания) снижает его выработку растением в разных погодных условиях. Особое значение имеет достаточное снабжение растений влагой в фазу формирования стеблей и листвы вплоть до появления бутонов. В эту фазу синтезируется уже достаточное количество органического вещества растением при фотосинтезе, количество которого может обеспечить субстрат для формирования витамина

С в других органах, кроме стромы хлоропластов. Ингибиование биосинтеза АСК конечным продуктом не происходило. Такой результат наблюдался и в продукции 2019 год, когда был получен наиболее высокая урожайность культуры за период наблюдений.

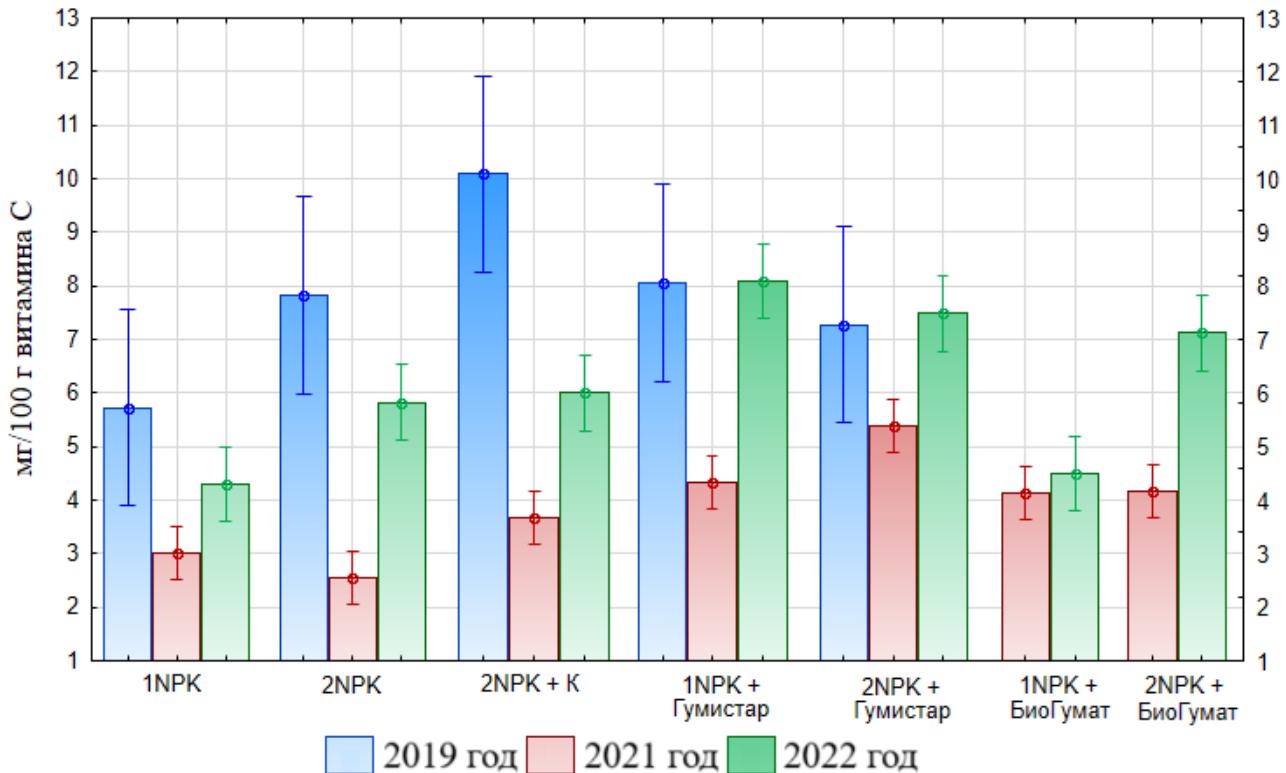


Рисунок 13. Содержание витамина С в исследуемых образцах.

Физиологически благоприятные погодные условия в июне (влажность, которая соответствовала климатической норме, и невысокие температуры) способствовали получению высокого урожая, однако очень низкое количество осадков и повышенные температуры в последний период вегетационного периода в июле и августе не позволяли растению снизить биосинтез АСК даже на фоне NPK (Кочетков, Кубарев, Верховцева, 2024). Таким образом АСК, как первичный антиоксидант для растений реагирует для защиты культуры в стрессовых условиях выращивания.

В свою очередь, ДФПГ-тест (рис. 14 табл. П.6.) позволил установить положительное влияние ГП на суммарную антиоксидантную активность клубней. Как более чувствительный антиоксидантный тест полученные значения антиоксидантной активности в картофеле, которые были выращены в период засухи 2021 года, не отличались. Возможно, применяемые обработки

ГП, а также изменение уровня минерального питания, не были достаточными, чтобы увеличить ту разнообразную антиоксидантную активность за счет многочисленных антиоксидантов (как первичных, так и вторичных), которую создают в таких стрессовых условиях для себя растения. В этом отношении требуются дополнительные исследования с большей базой данных

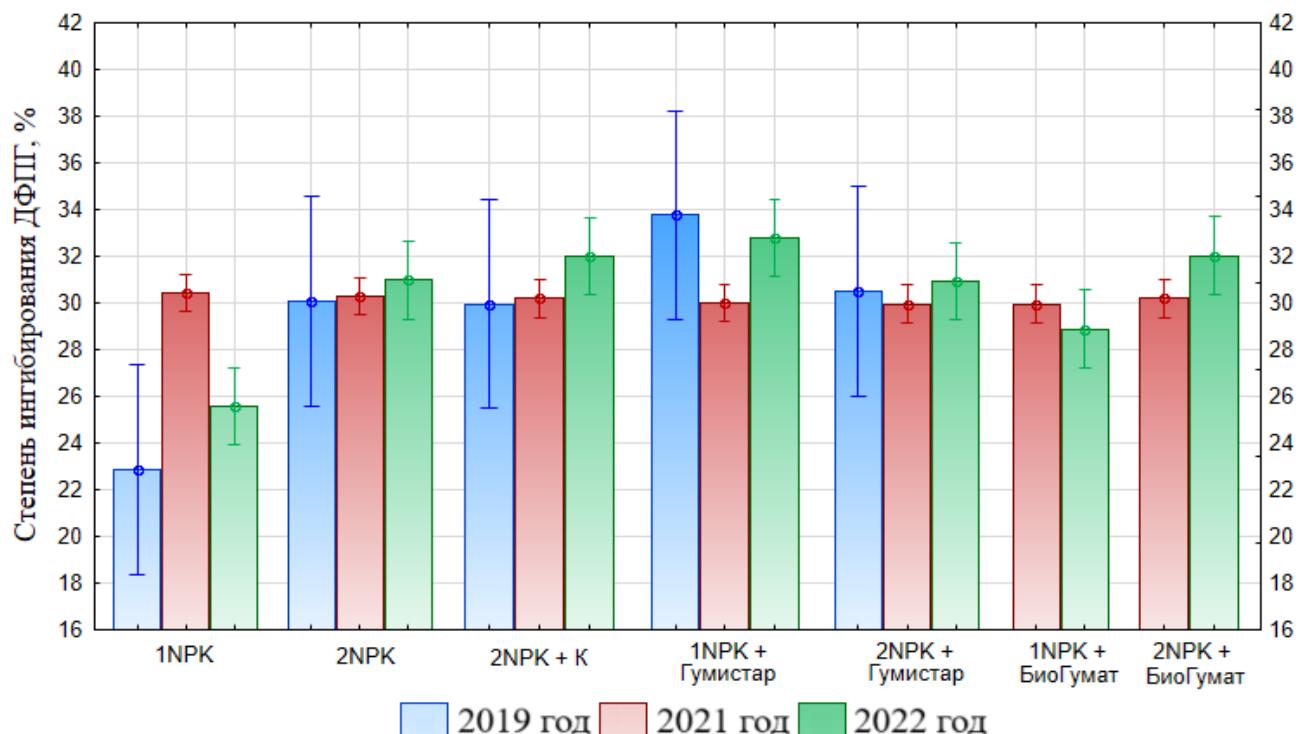


Рисунок 14. Антиоксидантная активность клубней картофеля.

3.8. Содержание крахмала и его резистентной фракции

Было установлено, что применение ГП повышает содержание крахмала в сухом веществе картофеля (рис.15, табл. П.7.), а применение Гумистара оказал положительное и значимо достоверное влияние даже в наименее благоприятный год выращивания картофеля.

В свою очередь, содержание РК (рис. 16, табл. П.7.) также коррелирует с содержанием общей фракции крахмала и отображает схожие тенденции. При этом на вариантах с применением гуминовых веществ, выход РК выше по сравнению с контрольными вариантами.

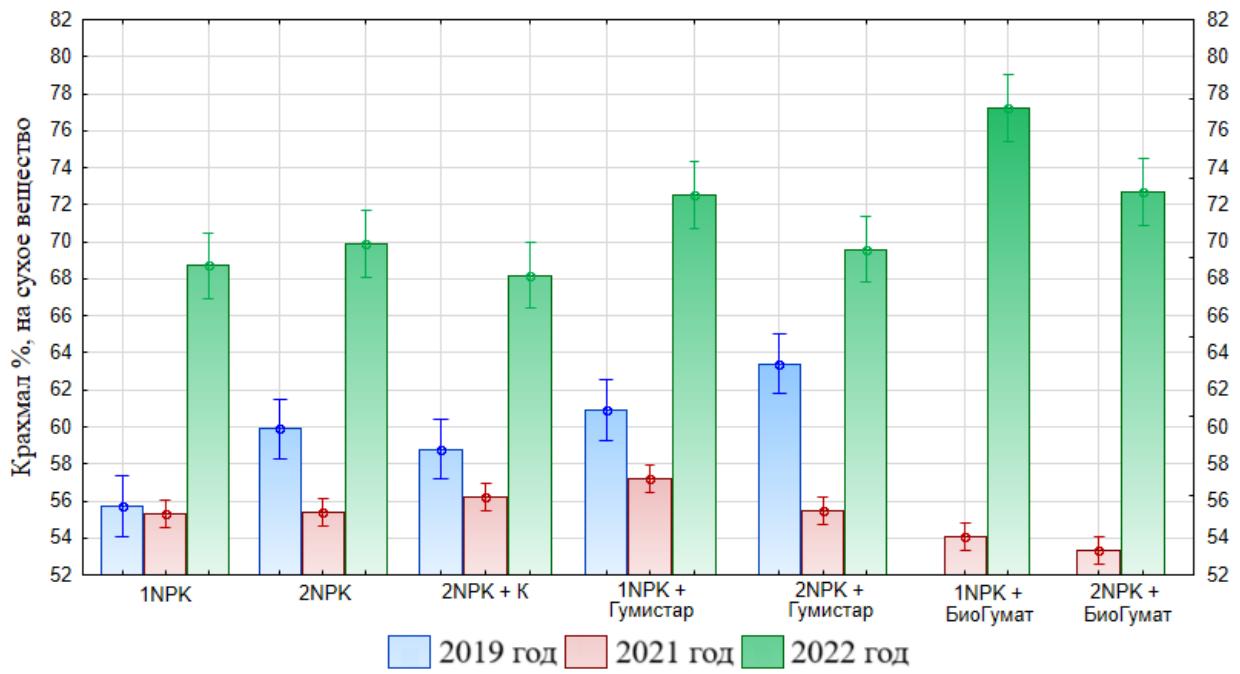


Рисунок 15. Содержание крахмала в исследуемых образцах.

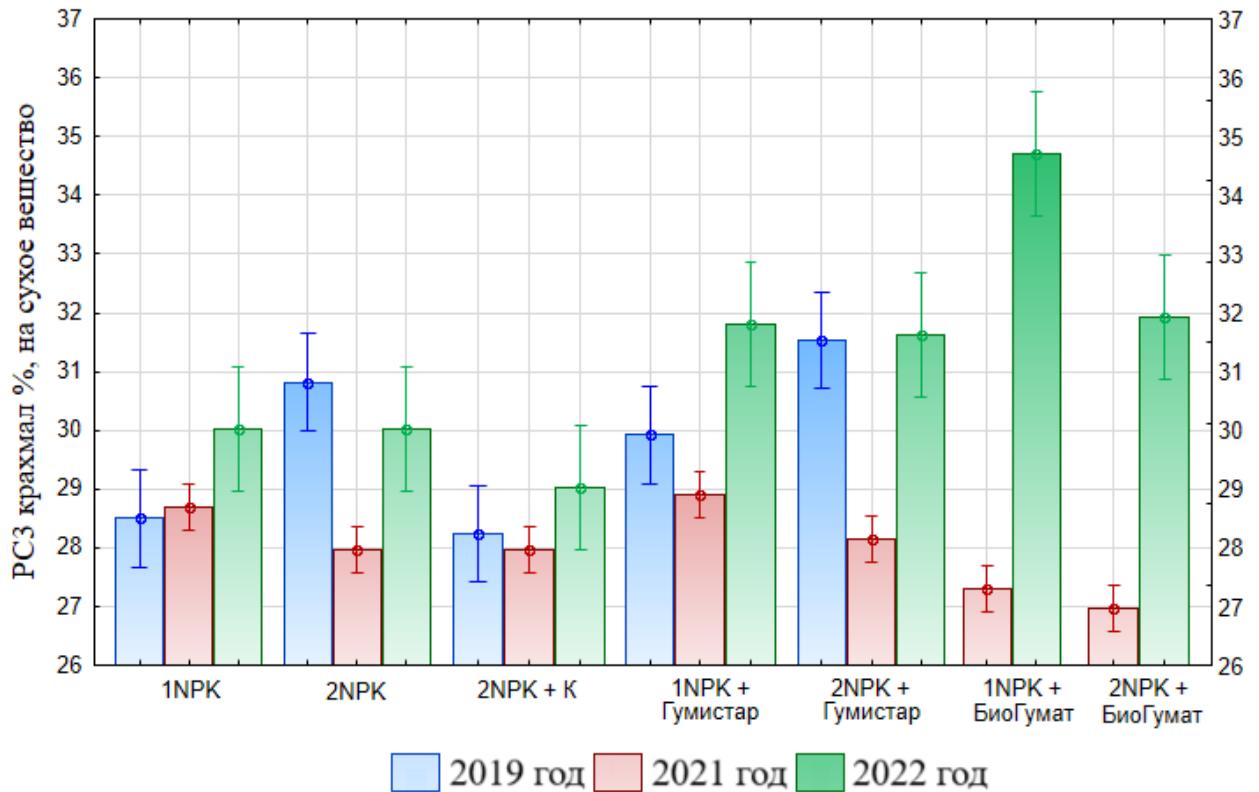


Рисунок 16. Содержание резистентного крахмала в исследуемых образцах.

3.9. Обсуждение результатов и корреляционные зависимости

Как известно, картофель относится к калиелюбивым культурам (Bian et al., 2022), поэтому обсуждение результатов начнем именно с этого элемента и корреляционных взаимосвязей с ним других элементов и качественных характеристик клубней картофеля, которые были выращены на опытных вариантах в нашем исследовании.

В отличие от других питательных веществ для растений, таких как N, S и P, практически не существует органических соединений, содержащих калий в качестве строительного элемента. Однако, наиболее важная в контексте нашего рассмотрения функция калия в растении – это регуляция активности ферментов и синтез белка, т.е. их активации, которая может происходить за счет изменения конформации структур белковых молекул. Активность ферментов может существенно меняться, если нарушается защитный гидратный слой поверхности молекулы, который поддерживает стабильность конформации белковой структуры белка. Катион калия присоединяется к поверхности гидратного слоя фермента, что вызывает изменение его активности.

Наиболее известна биохимическая роль калия в активации двух ферментов: пируваткиназы и крахмалсинтазы. Первый фермент катализирует последнюю реакцию гликолиза – превращение фосфоенопирувата в пируват, что обеспечивает образованием АТФ. Другой K⁺ – активируемый фермент осуществляет удлинение полисахаридной цепи, т.е. непосредственно участвует в образовании крахмала (Cui, Tcherkez, 2021).

Таким образом, калий непосредственно связан с такими важными энергетическими процессами синтеза АТФ, а, следовательно, с фосфором и азотом и продуктами биосинтеза на их основе (белковый и небелковый азот), также с важнейшим показателем качества картофеля – крахмалом.

Действительно, в процессе синтеза белка функция калия также определяется его способностью в поддержании пространственной организации ферментов. Так, калий необходим для поддержания требуемого

пространственного объединения тРНК и рибосомы при трансляции иРНК. Он нужен для активации пептидилтрансферазы, с участием которой происходит наращивание полипептидной цепи (Danchin, Nikel, 2019; Tirumalai et al., 2021).

Учитывая такую важную физиолого-биохимическую роль калия в соответствии с вышеизложенным, обсудим полученные нами данные полевого опыта и обнаруженные корреляционные зависимости между факторами в процессе выращивания культуры (рис. 17, табл. П.8.).

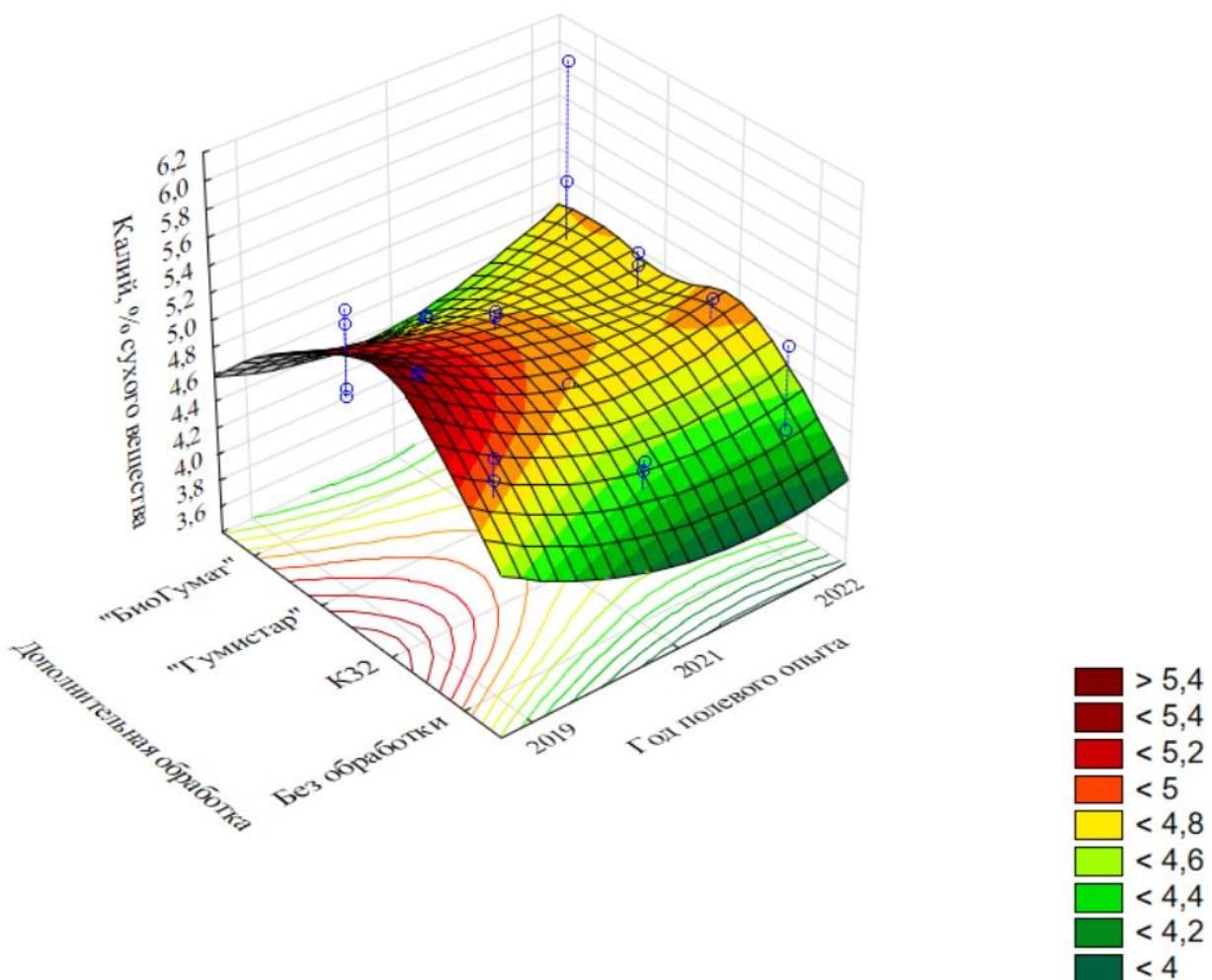


Рисунок 17. Влияние дополнительной фолиарной обработки на содержание калия (% сухого вещества) по годам.

Как было сформулировано в предположении нашего исследования «антиоксидантная активность картофеля снижается с повышением комфортности вегетационного периода для роста и развития культуры». Цветовая гамма трехмерного рисунка (рис. 18) свидетельствует, что

антиоксидантная активность клубней на вариантах с гуминовыми препаратами выше по сравнению с удобренными вариантами. Кажется, что это противоречит нашей гипотезе, что в более удобренных условиях антиоксидантная активность ниже.

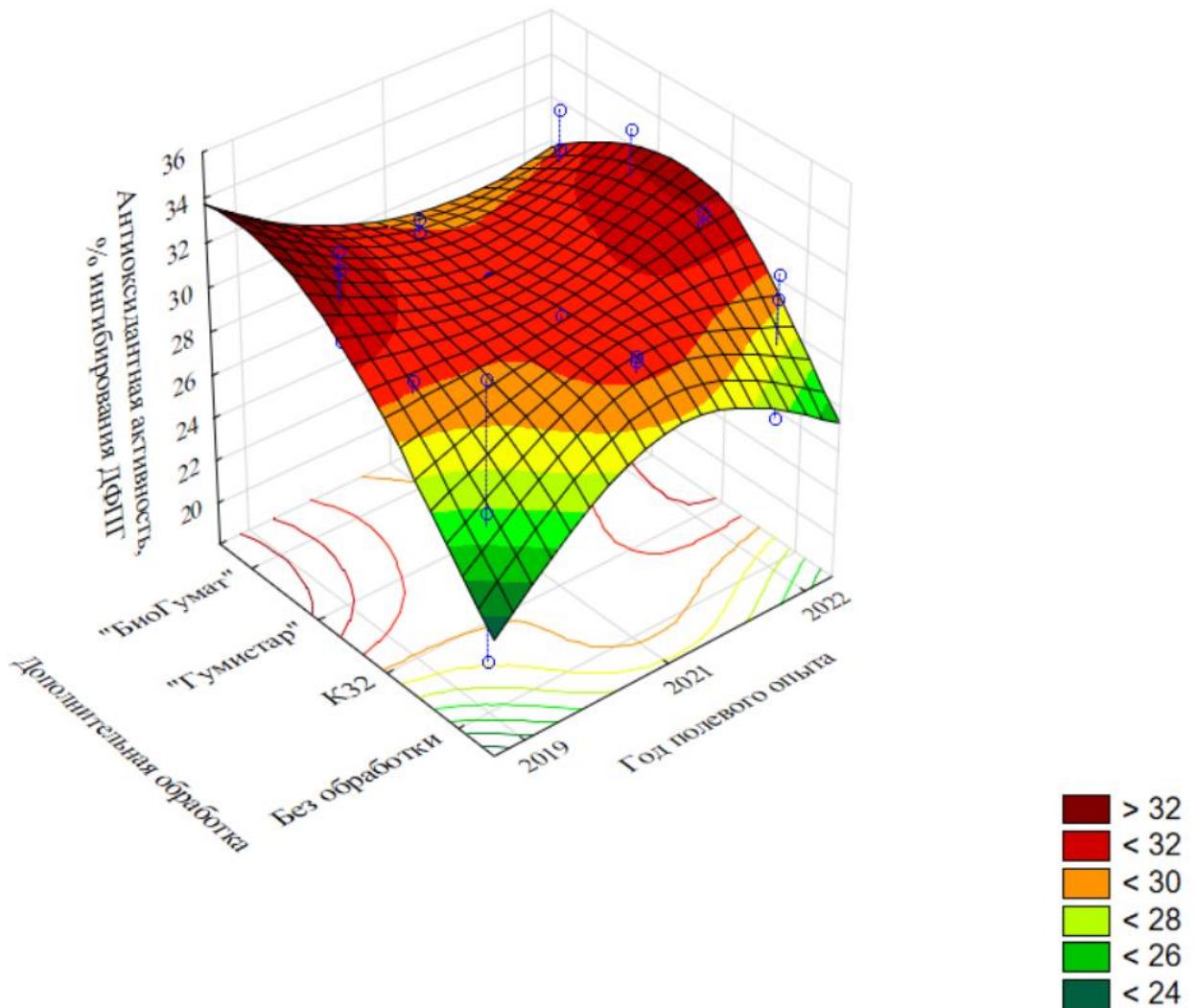


Рисунок 18. Влияние дополнительной обработки на антиоксидантную активность (% степени ингибирования ДФПГ) по годам.

Однако, с другой стороны, при рассмотрении изменений этих значений по годам исследования отметили, что в неблагоприятный год по метеорологическим условиям (2021 г., ГТК = 0,512, зона сухого земледелия, рис. 4) в сравнении с 2019 и 2022, АО активность клубней на контрольных вариантах значимо выше.

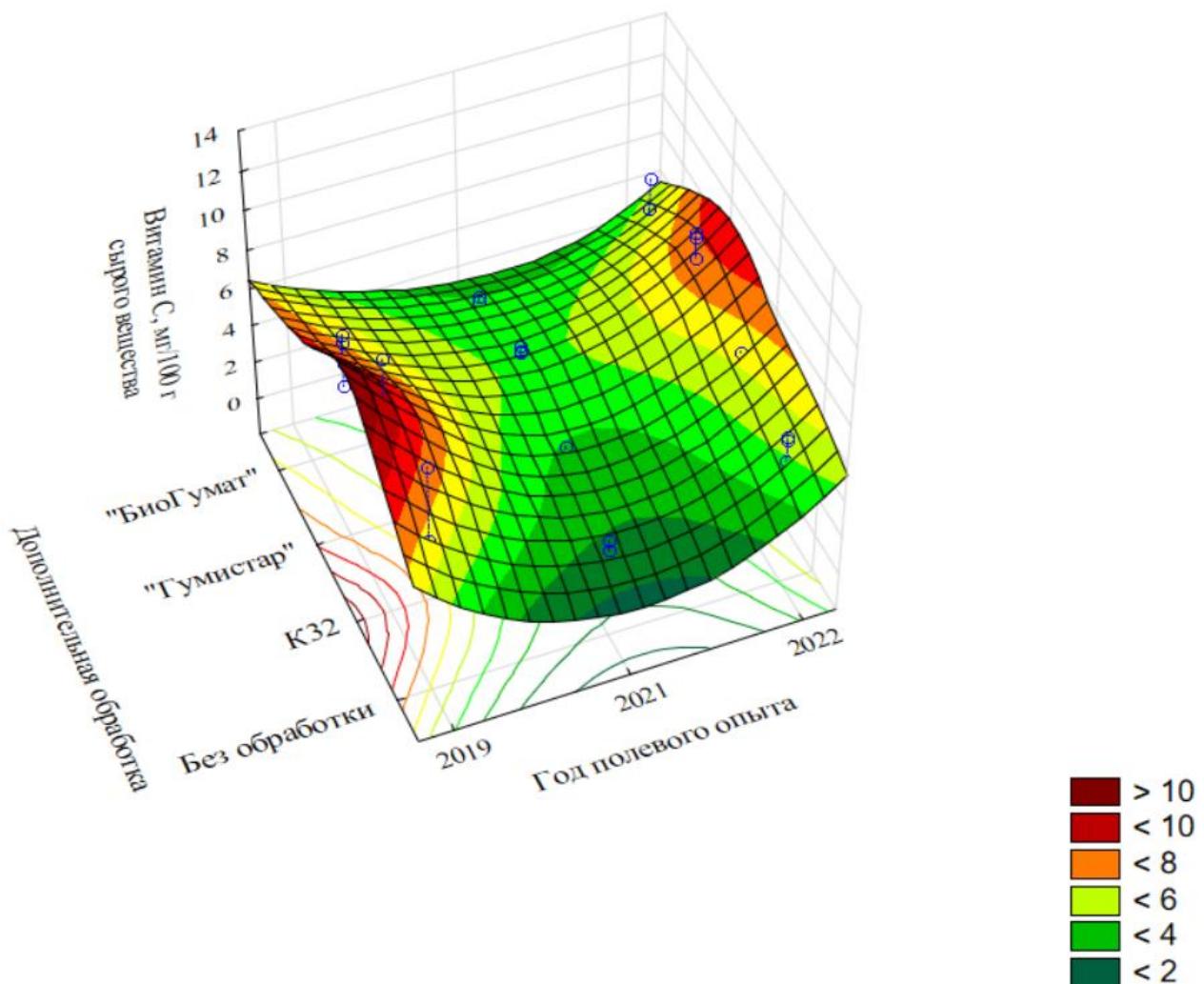


Рисунок 19. Влияние дополнительной фолиарной обработки на витамин С (мг/100 г сырого вещества) по годам исследования.

Следовательно, при засушливых условиях ГП помогают растениям переживать окислительный стресс. Наглядно это видно на (рис. 19), отражающем влияние дополнительного внесения калия (K_2S0_4 в 2019) и фолиарной обработки гумистаром (в 2022) на содержание витамина С. На этом графике отчётливо видна связь погодных условий вегетационного периода и АСК: в 2021 – наименьшее содержание, в 2019 и 2022 – количество АСК выше. При этом в 2019 году на графике наблюдается смещение в сторону калия (пик), в 2022 году – к Гумистару (пик). Можно уже на этом уровне обсуждения, указывать на то, что дополнительное применение калия оказывает положительное влияние на содержание АСК в клубнях картофеля в засушливый вегетационный период выращивания.

Влияние калия в данном процессе может объясняться непосредственной ролью этого элемента в процессе фотосинтеза (открывание и закрывание устьиц и транспорте продуктов фотосинтеза – моносахаридов по растительному организму, а также наращиванию полисахаридной цепи за счет активирования фермента). Здесь необходимо напомнить, что глюкоза – это ключевой предшественник синтеза АСК (Barata-Soares et al., 2004). Со времени первого выделения аскорбиновой кислоты АСК в 1928 г. было опубликовано немного работ, посвященных биосинтезу АСК в растениях. Только в 1998 году, вышла публикация, в которой Уилер, Джонс и Смирнофф на основе исследования листьев арабидопсиса предложили путь биосинтеза, который можно считать основным для образования АСК, в котором L-глюкоза через L-галактозу является ключевым предшественником синтеза этого витамина. Путь «Смирнова-Уиллера» (Wheeler, Jones, Smirnoff, 1998) функционировал и был активен во всех изученных растительных объектах, о чем свидетельствовало увеличение содержания АСК и включение меченых предшественников в ее состав. Поэтому не удивительна высокая степень корреляционной зависимости между содержанием калия в клубнях картофеля в нашем исследовании и содержанием АСК в неблагоприятный засушливый 2021 год исследования (табл. П.10). В совокупности за три года полевых экспериментов корреляционные зависимости между калием и содержанием АСК остаются на высоком положительном уровне также, как и суммарная антиоксидантная активность (табл. П.8.).

Продолжая рассмотрение корреляционных зависимостей калия, остановимся на взаимосвязи содержания этого элемента и крахмала в продукции. Учитывали влияние калия на активацию фермента крахмалсинтазы, непосредственно участвующего в наращивании полисахаридной цепи (Cui, Tcherkez, 2021), однако, рассмотрение этой корреляционной зависимости как в неблагоприятный год (2021), так и за три года исследования не показало значимых положительных взаимосвязей между содержанием калия и содержанием крахмала, хотя два других

вегетационных периода были удовлетворительны для выращивания картофеля (табл. П.8). Высокая положительная корреляция между содержанием крахмала отмечена только с содержанием резистентного крахмала, как в неблагоприятный год выращивания (табл. П.10), так и в остальные годы наблюдения (табл. П.9. и П.11). Было ожидаемо, что и за три года исследования именно эта корреляция показала высокие положительные значения (табл. П.12). Такая тесная положительная взаимосвязь показателей позволила утверждать, что количество резистентного крахмала в наибольшей степени зависит от биосинтеза общего количества крахмала и тех факторов, которые влияют на этот процесс.

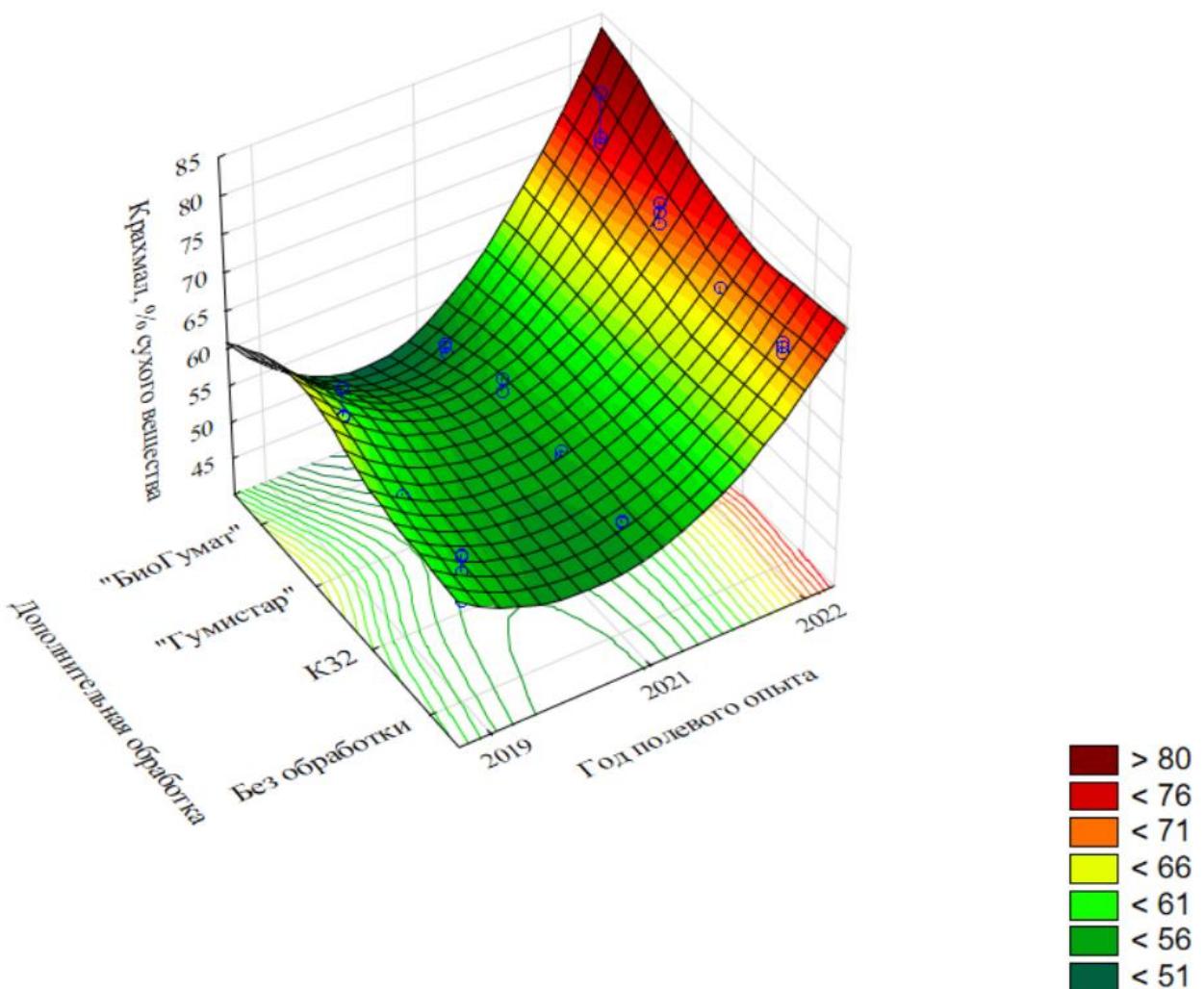


Рисунок 20. Влияние дополнительной фолиарной обработки на содержание крахмала (% сухого вещества) по годам исследования.

По анализу данных корреляционных зависимостей была выявлена высокая положительная зависимость между содержанием крахмала и

применением ГП в благоприятные годы выращивания и совокупно за три года наблюдения (рис. 20, табл. П.8, табл. П.12). Чтобы разобраться в этой зависимости, рассмотрели какие высокие значения корреляции были показаны для позиции антиоксидантная активность (фолиарное применение гумистара) с другими факторами нашего исследования. Так, высокие положительные коэффициенты корреляции, выявленные за три года, показали взаимосвязь фосфора и калия с содержанием общего азота, а калия также с содержанием азота белкового (табл. П.12). Высокая положительная корреляция содержания калия и фосфора была отмечена как в благоприятные годы исследования (табл. П.9 и П.11), так и в неблагоприятный засушливый год (табл. П.10).

В научных публикациях авторов (Gugała, Zarzecka, 2011; Klikocka, Główacka, 2013) обсуждается первостепенная роль калия и фосфора, наряду с магнием и кальцием, в растениях. Взаимосвязь этих элементов не удивительна, так как калий и фосфор являются неотъемлемой частью ферментов (для фосфора) и играют важную роль регуляторов метаболических процессов (для калия) через активацию этих ферментов (Rivero et al., 2003). Значение калия в биосинтезе белка мы обсуждали выше, ссылаясь на литературные источники о ферменте пептидилтрансферазе (Danchin, Nikel, 2019; Tirumalai, Rivas, Tran, Fox, 2021).

В контексте обсуждения взаимосвязи основных питательных макроэлементов логичны и высокие положительные корреляции, полученные для содержания фосфора и такого важного показателя качества клубней как выход товарного картофеля. Высокие положительные корреляции между выходом товарного картофеля и для содержания азота, как общего, так и белкового (табл. П.12), а высокие отрицательные значения показаны для погодных условий вегетационных периодов наблюдения.

Корреляционный анализ также выявил, что наибольшее влияние на химический состав клубней и выход товарного урожая оказала влияние погода, если мы оценивает совокупность данных за все три года. Однако, если

в ходе анализа мы будем рассматривать года по отдельности, данные будут значительно отличаться.

Так, в 2019 году можно увидеть, что доза NPK оказывает значительное влияние на содержание азота белкового – это сильная положительная корреляция ($r = 0,809$), в то время как форма ГП существенное всего влияет на содержание фосфора, антиоксидантную активность и содержание общего крахмала – все три корреляции положительные, средней силы. Также можно отметить, что корреляционный анализ выявил влияние ГП на выход товарного картофеля.

3.10. Анализ данных методом главных компонент

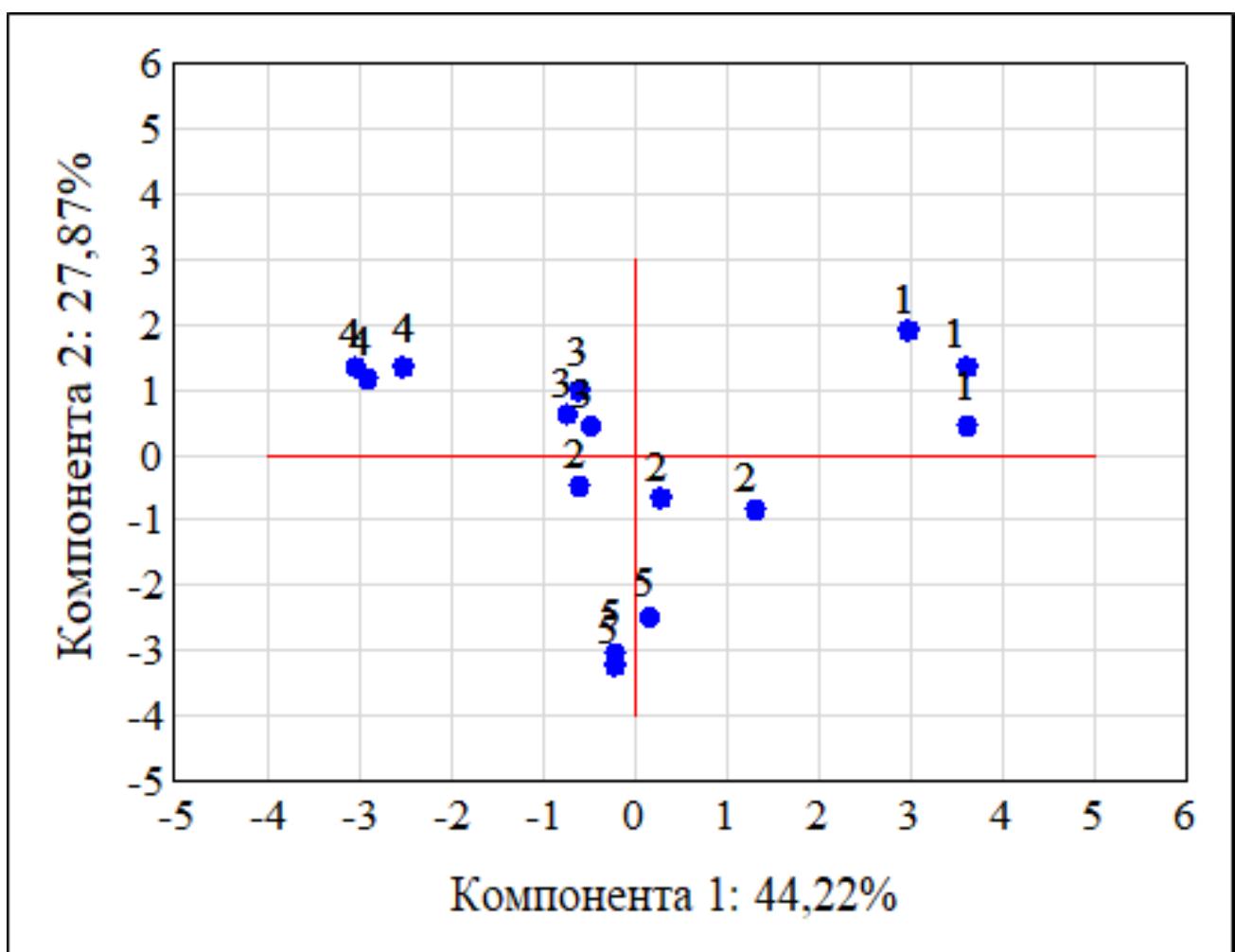


Рисунок 21. Проекции наблюдений на факторную плоскость компоненты 1 и 2, 2019 года исследования.

По результатам проведённого анализа методом главных компонент (МГК) было выявлено четыре главные компоненты (ГК) для каждого исследуемого года. Выделенные компоненты описывают 96,4; 84,3, 94,4% вариабельности данных, полученных за 2019, 2021 и 2022 год, соответственно (табл. 2). Для каждого года исследования было выделено одинаковое число ГК (табл. П.13, П.14, П.15).

Анализ наблюдений и их проекция на выделенные 4 компоненты позволило установить, что во всех трёх годах исследования (рис. 21, 22, 23) данные достоверно различаются между вариантами и при этом кластеризируются между собой. Данное наблюдение указывает на то, что полученные в результате исследования данные достоверны.

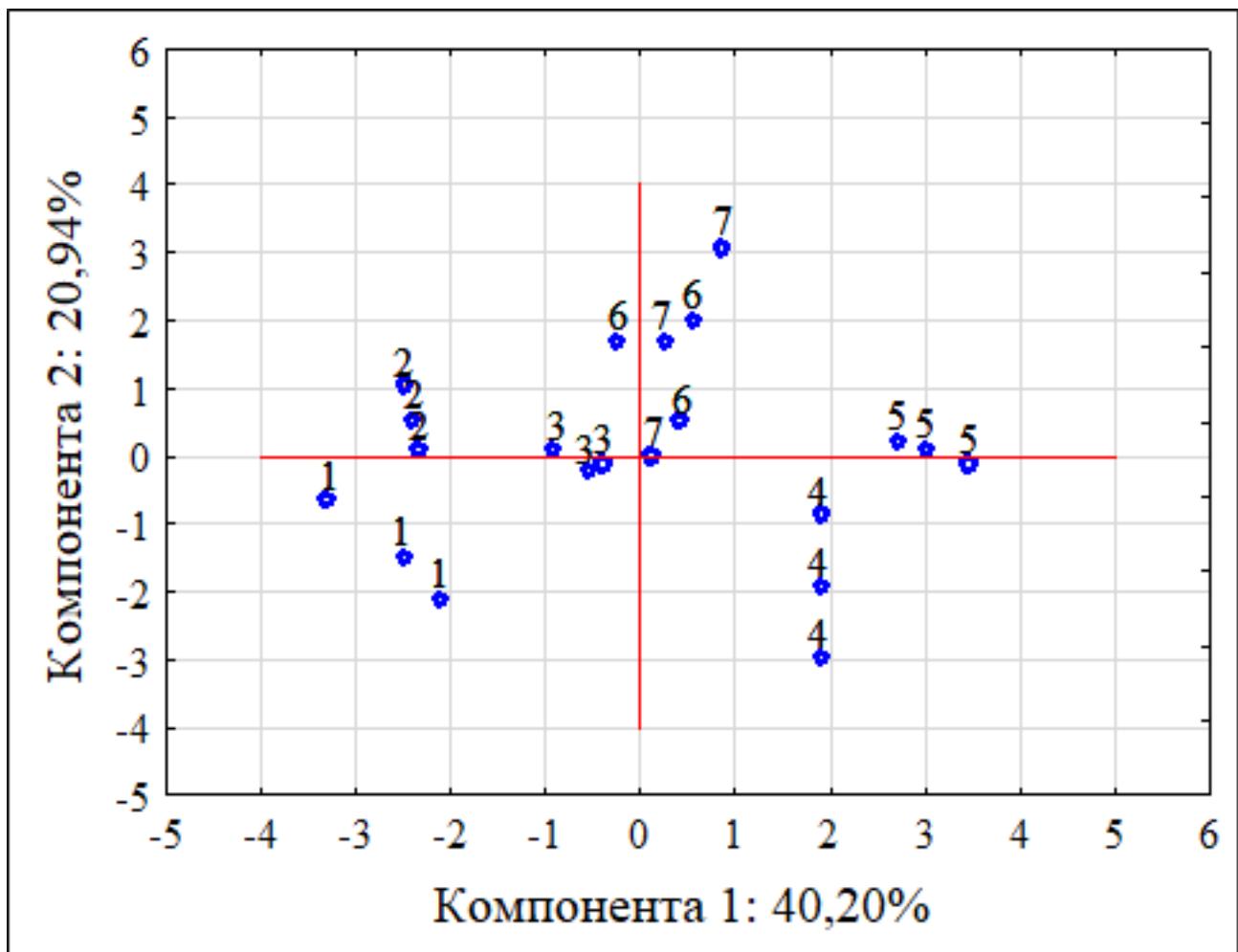


Рисунок 22. Проекции наблюдений на факторную плоскость компоненты 1 и 2, 2021 года исследования.

Единственное исключение – результаты 2021 года (рис. 22), в которых наблюдается кластеризация между вариантами 6 и 7 – с учётом того, что в обоих вариантах использовался препарат БиоГумат. Уместно сделать вывод о том, что в случае этого конкретного года именно этот препарат оказывал основное влияние, в то время как нитроаммофоска не оказала должного эффекта. Напомним, что у этого препарата более высокая АО активность по сравнению с Гумистаром.

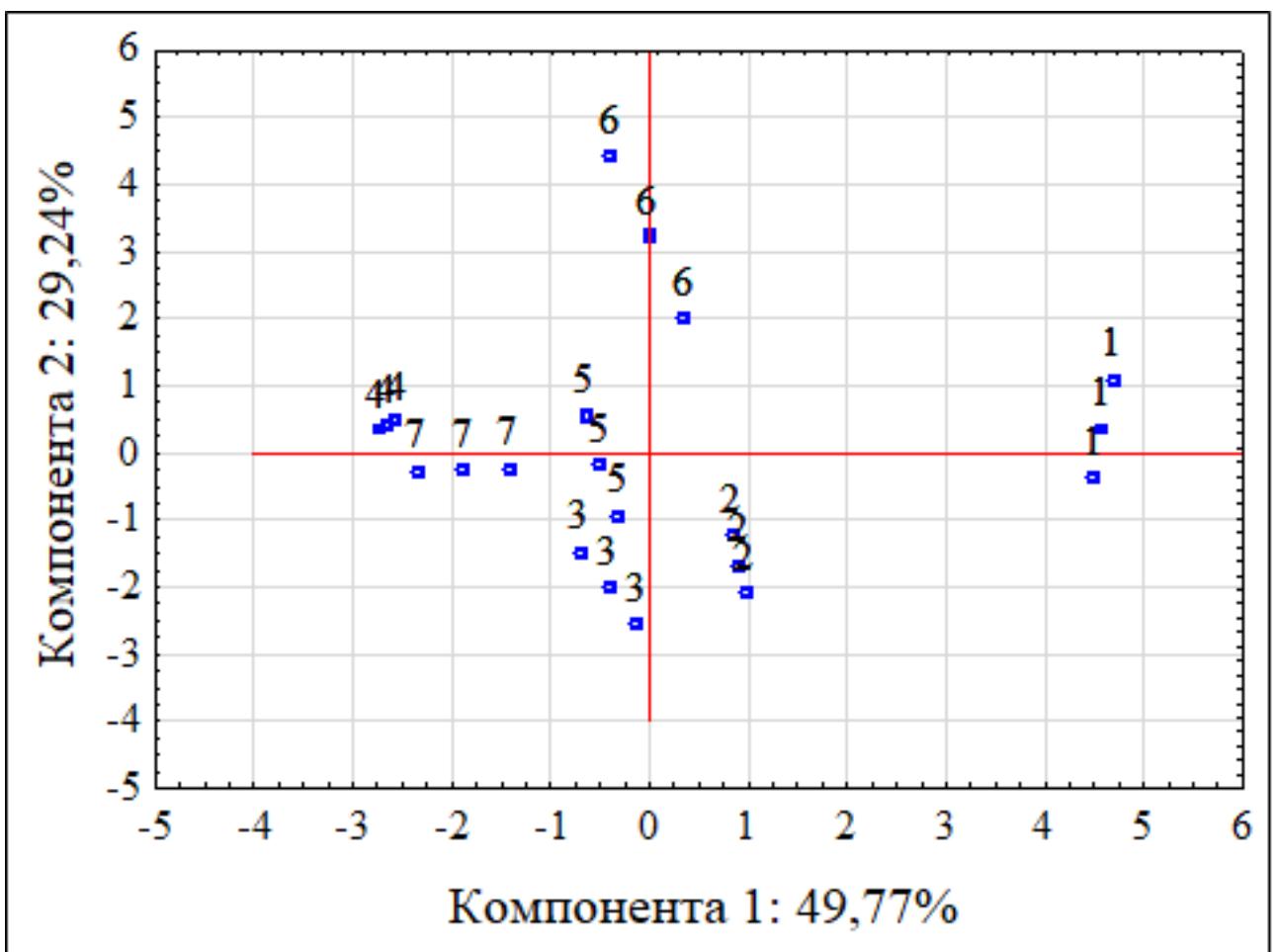


Рисунок 23. Проекции наблюдений на факторную плоскость компоненты 1 и 2, 2021 года исследования.

Анализ состава ГК 1 (табл. 2) показал, что данные за все три года включали в себя содержание фосфора и витамина С – элементов энергетического обмена и защиты растений. Анализ также отнёс такие показатели к 1-ой компоненте как калий и товарный картофель за 2019 и 2021

годы исследования, АО активность за 2019 и 2021 год, белкового азота за 2021 и 2022.

В свою очередь, к ГК 2 явно отнесены элементы, связанные с биосинтезом крахмала, – во всех трёх вариантах именно к этой компоненте относится как крахмал, так и его РК фракция.

Показано также, что в 2019 и 2022 году, с ГТК = 0,762 и 0,736, соответственно, АО активность и нитраты были выделены в первую компоненту, в то время как в 2021 году, который характеризовался засухой (ГТК = 0,512), они были отнесены в 4-ю и 3-ю, соответственно, что указывает на различия в метаболических процессах, происходящих в клубнях картофеля в разных по вегетационным периодам годам.

Таблица 2. Взаимосвязь характеристик клубней с главными компонентами, по годам.

Компонента	Год исследования		
	2019	2021	2022
Компонента 1	44,22% Антиоксидантная активность, витамин С, фосфор, калий, товарный картофель, нитраты	40,20% Витамин С, фосфор, калий, товарный картофель, белковый азот,	49,71% Антиоксидантная активность, витамин С, фосфор, белковый азот, азот общий, нитраты
Компонента 2	27,87% Крахмал, РК белковый азот	20,94% Крахмал, РК	29,24% Крахмал, РК
Компонента 3	16,22% -	14,56% Азот общий, нитраты	9,45% Товарный картофель
Компонента 4	8,13% Азот общий	8,71% Антиоксидантна я активность	5,98% Калий

«%» – то, насколько компонента описывает модель в пределах выбранного года. «–» обозначает, что изучаемые показатели хоть и имеют отношение к этой компоненте, но связи с другими компонентами сильнее.

Стоит также отметить, что в 2019 году нитраты могут быть отнесены к 3-й компоненте – отношения к первой компоненте равны $r = -0,65$, а к третьей $r = -0,62$ (табл. П.13). Поскольку корреляционные отношения примерно равны, но первая компонента описывает больший процент модели, корректнее отнести показатель содержания нитратов к первой компоненте.

В целом, показатели по годам исследования для трёх разных вегетационных периодов на одном поле разделены на разные компоненты, что может говорить о различиях в условиях выращивания культуры по годам.

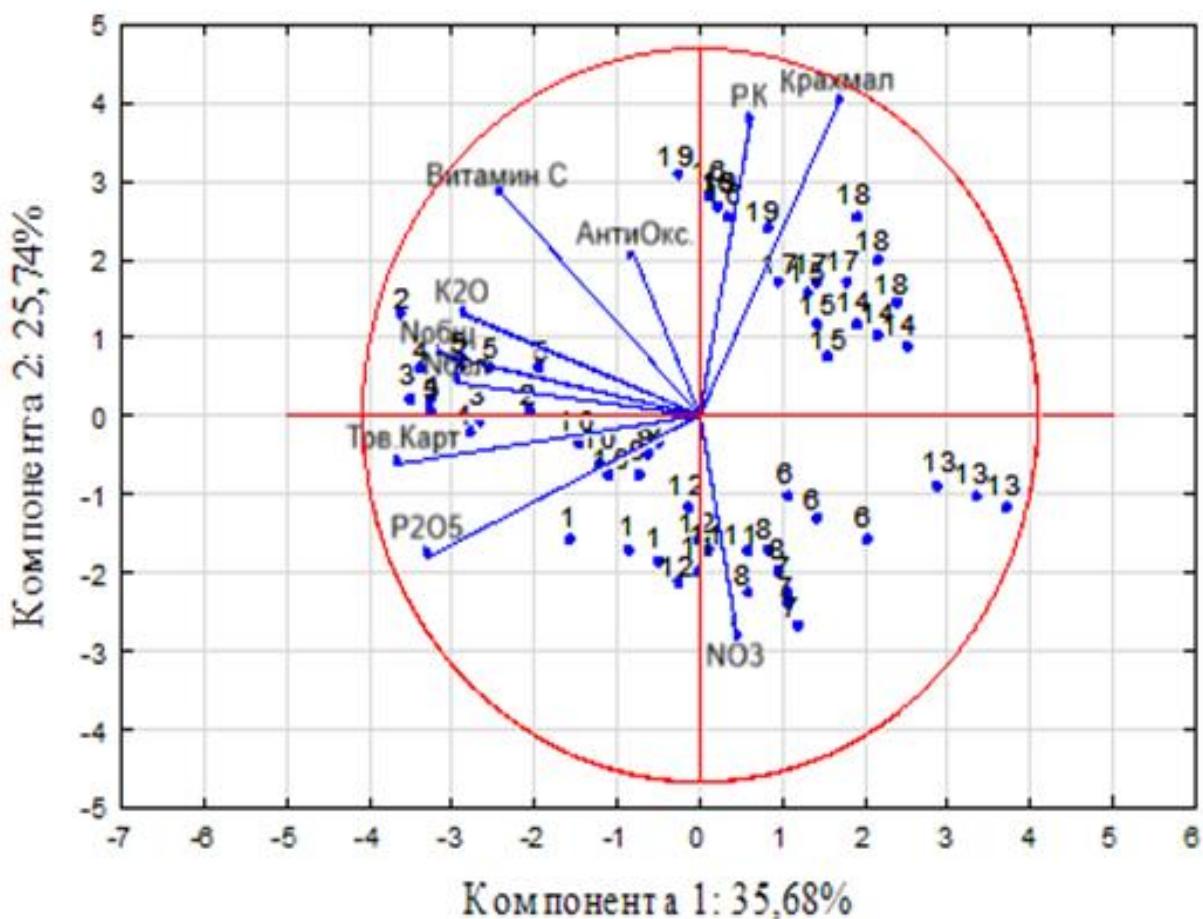


Рисунок 24. Проекции наблюдений и агрохимических показателей на факторную плоскость компоненты 1 и 2.

Результаты анализа МГК позволили сгруппировать полученные варианты опыта по показателям за 3 года исследования – на графике проекции данных по отношению к 1ой и 2ой компоненте (рис.24) (матрица построена по совокупному объёму данных за 3 года исследования) можно выделить 3

группы, соотносящиеся по годам. Для 2019 – точки с 1 по 5, для 2021 с 6 до 12 и для 2022 с 13 по 19. При этом в случае 2019 и 2022 году контрольные точки (1 и 13, соответственно) выпадают из общей кластеризации. Данные за 2019-ый год лучше всего описываются первой компонентой, как и такие показатели: содержание витамина С, калия, фосфора, азота общего и белкового. В то же время кластеры 2021 больше связаны со второй компонентой и показателями нитратов, а 2022 имеет примерно одинаковое отношение между компонентами и характеризуется показателями крахмала и его резистентной фракции.

Наличие корреляционной матрицы, использованной в МГК, позволило применить алгоритм NIPALS для 4-х наиболее значимых компонент. С помощью данного математического метода был проведён анализ для анализируемых показателей и выявлены варианты опыта, оказавшие наибольшее влияние на качественные показатели клубней картофеля (табл. 3).

Таблица 3. Результаты анализа NIPALS

Вариант	Сила	IMP	Вариант	Сила	IMP	Вариант	Сила	IMP
2019			2021			2022		
1NPK	0,923	2	1NPK	0,805	3	1NPK	0,468	5
2 NPK	0,048	5	2 NPK	0,914	1	2 NPK	0,542	4
2 NPK + K	0,810	3	2 NPK + K	0,556	4	2 NPK + K	0,433	7
1 NPK + Гумистар	0,964	1	1 NPK + Гумистар	0,891	2	1 NPK + Гумистар	0,922	1
2 NPK + Гумистар	0,788	4	2 NPK + Гумистар	0,477	6	2 NPK + Гумистар	0,323	6
			1 NPK + БиоГумат	0,250	7	1 NPK + БиоГумат	0,903	3
			2 NPK + БиоГумат	0,546	5	2 NPK + БиоГумат	0,918	2

Таким образом, в 2019 году наиболее перспективным вариантом, был опыт с использованием Гумистара на низком минеральном фоне (совокупная сила критерия = 0,96).

В 2021 году по результатам этого же анализа наиболее эффективным оказался 2-ой вариант опыта – повышенный минеральный фон без использования дополнительных удобрений (совокупная сила критерия = 0,91), однако вторым по эффекту был вариант с использованием Гумистара на низком минеральном фоне (совокупная сила критерия = 0,89), что позволило предположить, если не равнозначность, то близость влияния этих вариантов опыта с точки зрения оказанного положительного влияния в засушливый вегетационный период.

За последний год исследования было выделено 2 перспективных варианта, оказавших наибольшее влияние. При этом лучшим был вариант Гумистар на невысоком минеральном фоне (совокупная сила критерия = 0,922). Вторым вариантом по эффективности за этот год был вариант опыта с использованием БиоГумата на увеличенном минеральном фоне (совокупная сила критерия = 0,917).

Заключение

Таким образом, применение гуминовых препаратов Гумистар Универсальный и БиоГумат, на фоне минеральных удобрений, не только достоверно повышало выход товарного картофеля относительно как контрольных вариантов, так и вариантов с применением дополнительного внесения минеральных удобрений, но и положительно сказывалось на биохимическом составе клубней.

В первую очередь, стоит акцентировать внимание на АО активности – в вариантах с использованием изучаемых препаратов возрастала как устойчивость к свободным радикалам кислорода (ДФПГ-тест), так и наблюдалось увеличение количества первичного антиоксиданта -витамина С - в клубнях, обработанных ГП растений, по сравнению с контрольными

вариантами. Следовательно, это не только способ повысить пищевую ценность продукции, но и увеличение устойчивости клубней к инфицированию, а также расширение периода их лёжкости при хранении, что, впрочем, требует дальнейшего изучения.

Прибавки непосредственно резистентной фракции крахмала не наблюдалось в нашем исследовании. Рост резистентного крахмала происходит вместе с количеством общего крахмала, что, впрочем, также представляет ценность как для диетического питания, так и для пищевой промышленности производства питательных компонентов из картофеля.

Помимо этого, было установлено положительное влияние дополнительного внесения K_2SO_4 на содержание витамина С в клубнях картофеля в неблагоприятный вегетационный период (засуха).

Таким образом, полученные данные демонстрируют влияние ГП на урожайность, выход товарного картофеля, АО свойства и содержание фракций крахмала клубней картофеля. Вместе с тем, результаты этого исследования представляют не меньший интерес и в прикладном отношении, так как могут быть использованы для повышения устойчивости культуры к стрессовым ситуациям в период выращивания, что положительно сказывается на выходе товарного картофеля. Эти результаты могут быть использованы в сельскохозяйственном производстве для повышения продуктивности растений и увеличению питательной ценности крахмалопродуктов для населения.

Выводы

1. Фолиарная обработка ГП Гумистар Универсальный и БиоГумат на фоне минеральных удобрений значимо повышала выход товарного картофеля в неблагоприятный год выращивания растений (засуха). При этом с урожайностью значимо положительно коррелировало его качество по количеству белкового азота ($r = +0,66$), фосфора ($r = +0,65$), калия ($r = +0,40$) и витамина С ($r = +0,67$).

Двукратное увеличение уровня минерального питания (до N64P64K64) в неблагоприятный вегетационный период не привело к повышению выхода товарного картофеля и улучшению показателей его качества, кроме возрастания содержания калия ($r = +0,41$). Такой результат по выходу товарного картофеля был получен и за три года исследования.

2. Дополнительное внесение калийного удобрения (в форме K_2SO_4) оказалось положительное влияние на содержание витамина С в клубнях картофеля в засушливый вегетационный период выращивания культуры.

3. При фолиарной обработке растений ГП наблюдали значимое повышение АО активности клубней картофеля, даже в 2021, вегетационный период которого был определен, как засуха.

4. Установлена высокая положительная зависимость между содержанием крахмала и применения ГП ($r = +0,69$ и $0,68$ для 2019 и 2022, соответственно). Также значимое повышение содержания крахмала и резистентного крахмала наблюдали при благоприятных погодных условиях выращивания картофеля (синтез углеводной части продукции), тогда как в неблагоприятных условиях (засуха) метаболизм растений был направлен на синтез белковых соединений.

5. При применении статистической обработки - метода главных компонент выделено 4 компоненты, оказывающих влияние на вариабельность полученных экспериментальных данных. Из них наиболее влиятельной оказалась первая компонента, описывающая в любом году исследования

показатели фосфора и витамина С, а также вторая компонента, связанная с биосинтезом крахмала.

6. Использование алгоритма NIPALS подтверждает – наиболее влиятельными вариантами за 3 года исследования были варианты опыта с обработкой ГП.

Список сокращений

- TEAC – эквивалентная антиоксидантная способность Тролокса
RDS – быстро перевариваемый крахмал
SDS – медленно перевариваемый крахмал
NIPALS – алгоритм итерационного метода с использованием частных наименьших квадратов
АО – антиоксидантная активность
ACK – аскорбиновая кислота
АФК – активная форма кислорода
АБТС – 2,2-азино-бис3-этилбенз-тиазолин-6-сульфоновая кислота (ABTS)
ГВ – гуминовые вещества
ГК – главная компонента
ГП – гуминовый препарат
ГТК – гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова
ДФПГ – 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH)
РК – резистентный крахмал (RS)
ТЭ – эквивалент Тролокса
СРК – свободнорадикальная реакция кислорода
МГК – метод главных компонент

Список использованной литературы

1. Алёхин Н.Д., Балконин Ю.В., Гавриленко В.Ф. Физиология растений: учебник для студ. Вузов— М.: Академия. 2005. – 640 с.
2. Балабко П.Н., Головков А.М., Хуснетдинова Т.И., Черкашина Н.Ф., Карпова Д.В., Батурина Л.К. Значение гумата и биоуд-1 в технологии выращивания картофеля на дерново-подзолистой почве // Проблемы агрохимии и экологии. – 2010 – №2. – С. 44 – 49.
3. Безуглова О.С., Полиенко Е.А. Применение гуминовых препаратов под картофель и озимую пшеницу // Проблемы агрохимии и экологи. – 2011. – №4. – С. 29–32.
4. Букасов С.М., Бавыко Н.Ф, Костица Л.И. и др. Методические указания по определению столовых качеств картофеля. ВИР, 1975. – 51 с.
5. Днепровский А. С., Темникова Т. И. Теоретические основы органической химии. 2-е издание. — Л.: Химия, 1991. – 558 с.
6. Жукова Н.И., Ким И.А. Некоторые биохимические показатели картофеля приморской селекции // Научный альманах. – 2017 – N 1-3. – С. 27.
7. Кляйн О.И, Николаев И.В., Степанова Е.В., Королева О.В. Влияние минеральных и органических удобрений на антиоксидантную емкость почв // Лесной вестник. – 2012. – №1. – С. 109 – 111.
8. Колупаев Ю.Е., Карпец Ю.В., Кабашникова Л.Ф. Антиоксидантная система растений: клеточная компартментация, защитные и сигнальные функции, механизмы регуляции (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. – 2019. – Том 55. – № 5. – С. 419–440.
9. Кочетков И. М., Кубарев Е. Н., Верховцева Н. В. Влияние агротехнологических приёмов на урожайность и качественные показатели картофеля (*Solanum tuberosum L.*) // Сборник научных статей международной научно-практической конференции на тему: «прошлое, настоящее состояние и перспективы развития овощеводства, картофелеводства, и виноградарства Таджикистана». – Душанбе. 2024. – С. 248-252.

10. Кубарев Е.Н., Верховцева Н.В., Кузьмина Н.В. Микробоценоз кишечного тракта *Eisenia fetida* в зависимости от субстрата. // Материалы II Международной научно-практической конференции «Человек и животные». – Астрахань. 2005 – С. 214-215.
11. Куликова Н.А. Защитное действие гуминовых веществ в водной и почвенной средах в условиях абиотических стрессов. Дис. ... д-ра биол. наук.: Москва. 2008. 302 с.
12. Лукьянова М.В., Верховцева Н.В. Эффективность применения препаратов с физиологическими активными свойствами при выращивании картофеля (*Solanum tuberosum L.*) // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. – № 2. – С. 31–36.
13. Лукьянова М.В., Верховцева Н.В., Структура микробного сообщества в почве под картофелем (*Solanum tuberosum L.*) в опыте с гуминовым препаратом и минеральным удобрением. // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. – №3. – С. 50–59.
14. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии / О.А. Амельянчик, Т.Н. Болышева, Н.Ф. Гомонова, Е.П. Дурынина, В.С. Егоров, Е.В. Егорова, Н.Л. Едемская, Е.А. Карпова, В.Г. Минеев, В.Г. Прижукова, В.Г. Сычев: под. ред. В.Г. Минеева. — М.: «Московский государственный университет», 2001. — 688 с.
15. Мудрых Н.М., Алешин М.А. Пособие к лабораторным занятиям по агрохимии. – Пермь: Пермская ГСХА, 2011. – 51 с.
16. Никитишен В. И. Питание растений и удобрение агроэкосистем в условиях ополий Центральной России. - М.: Наука. 2012 – 484 с.
17. Павловская Н.Е., Гагарина И.Н., Горькова И.В., Солохина И.Ю., Дуданов И.И. Влияние ультразвука на крахмал картофеля // Пищевая промышленность. – 2012. – №. 12. – С. 52-53.
18. Патент RU 2787051 С1. Способ определения степени резистентности крахмала в пищевых продуктах и ингредиентах. // Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный

исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха" / Кузина Л.Б., Кузьмина Л.Г., Никитина М.Ф., Бызов В.А., Лукин Н.Д., Лунина Т.Л., Карпина О.В., Резанов В.В. 2022.

19. Полесская О. Г. Растительная клетка и активные формы кислорода: учебное пособие / Под. ред. И.П. Ермакова. – Москва: КДУ – 2007 – 140 с.
20. Попков В. М., Чеснокова Н. П., Ледванов М. Ю. Активация липопероксидации как ведущий патогенетический фактор развития типовых патологических процессов и заболеваний различной этиологии. – Монография. Академия Естествознания. 2012. 275 с.
21. Прадедова Е.В., Ишевая О.Д., Саляев Р.К. Классификация системы антиоксидантной защиты как основа рациональной организации экспериментального исследования окислительного стресса у растений // Физиология растений. – 2011. – Т. 58. – № 2. – С. 177–185.
22. Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР / Г.Т. Селянинов // Вопросы агроклиматического районирования СССР / ЗАСХНИЛ; под ред. Ф.Ф. Давитая, А Н. Шульгина. - М., Изд-во м-ва сел. хозяйства СССР, 1958. - С. 7-13
23. Симаков Е.А., Анисимов Б.В., Скрялова Н.П., Яшина И.М., Еланский С.Н. Сорта картофеля, возделываемые в России. Приложение к газете «Картофелевед». – 2005. – 112 с.
24. Синькевич М.С., Дерябин А.Н., Трунова Т.И. Особенности окислительного стресса у растений картофеля с измененным углеводным метаболизмом // Физиология растений. – 2009. – Т. 56. – № 2. – С. 18–192.
25. Смирнова О.В., Ефимова И.В., Хилько С.Л., Опейда И.А., Рыбаченко В.И., Антиоксидантные свойства гуминовых кислот в процессах радикально-цепного окисления // Наносистеми, наноматериали, нанотехнологii. – 2010. – Т.8. – №4. – С. 835–841
26. Сутягин В.П., 2007. Принципы формирования устойчивости агрофитоценозов адаптивно-ландшафтного земледелия.-Тверь.: Агросфера. 252 с.

27. Федотов В.А., Свиридов А.К., Федотов С.В., 2006. Агротехнологии зерновых и технических культур в Центральном Черноземье. Учебного пособия для студентов, обучающихся по агрономическим специальностям. 3-е изд., перераб. и доп. Под общей редакцией профессора В.А.Федотова. - Воронеж: Изд-во «Истоки». 180 с.
28. Шарова Е.И., 2016. Учебное пособие: антиоксиданты растений. СПб. Изд-во С.-Петерб, университета. 140 с
29. Щегорец О.В. Амурский картофель. Биологизация технологии возделывания. – Благовещенск: Издательство компания «РИО», 2007. – С. 400.
30. Щербакова Н.А., Тютюма Н.В. Различные сорта картофеля в аридных условиях Нижнего Поволжья // Аграрная наука. – 2012. – № 11. – С. 15–16.
31. Ягофаров Д. Ш., Канарский А. В., Сидоров Ю. Д., Поливанов М. А. Физико-химические свойства картофельного крахмала. // Вестник Казанского технологического университета – 2012. – Т. 15. – №. 12. – С. 212-215.
32. Якименко О. С., Терехова В. А. Гуминовые препараты и оценка их биологической активности для целей сертификации //Почвоведение. – 2011. – №. 11. – С. 1334-1343.
33. Abdirahman, Said & Joseph, Mafurah & Kimurto, Paul & Nyongesa, Moses. Effect of biofertilizers and farmyard manure on growth and tuber yield of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) in highlands of Kenya //European Journal of agriculture and food sciences. – 2022. – V. 4, № 5. – P. 83-89.
34. Adetuyi F.O., Karigidi K.O. Akintimehin E.S., Adeyemo O.N. Antioxidant Properties of Ageratum conyzoides L. Asteraceae Leaves // Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research – 2018 – V.53, № 4 – P. 265-276.
35. Aksu G., Altay H. The Effects of Potassium Applications on Drought Stress in Sugar Beet // Sugar Tech. – 2020. – V. 22, № 6. – С. 1092-1102.
36. Alasalvar C., Grigor J., Zhang D., Quantick P., Shahidi F. Comparison of volatiles, phenolics, sugars, antioxidant vitamins, and sensory quality of different

- colored carrot varieties // Journal of agricultural and food chemistry. – 2001. – V. 49, № 3. – P. 1410-1416.
37. Al-Saikhan, M. S., Howard, L. R., & Miller, J. C., Jr. Antioxidant activity and total phenolics in different genotypes of potato (*Solanum tuberosum*, L.) // Journal of food science. – 1995. – V. 60, № 2. – P. 341-343.
38. Andre, C. M., Oufir, M., Guignard, C., Hoffmann, L., Hausman, J. F., Evers, D., & Larondelle, Y. Antioxidant profiling of native Andean potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) reveals cultivars with high levels of β-carotene, α-tocopherol, chlorogenic acid, and petanin. // Journal of Agricultural and Food Chemistry –2007. – V. 55. – P. 10839–10849.
39. Antolovich, S. D., Antolovich B. F. The effects of microstructure, deformation mode and environment on fatigue // Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures: Proceedings of the 16th European Conference of Fracture, Alexandroupolis, Greece, July 3–7, 2006. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. – P. 1245-1246.
40. Antolovich M., Prenzler, P. D., Patsalides, E., McDonald, S., & Robards, K. Methods for testing antioxidant activity // Analyst. – 2002. – V. 127, № 1. – P. 183-198.
41. Asada Kozi. Production and Scavenging of Reactive Oxygen Species in Chloroplasts and Their Functions. // Plant physiology. – 2006. – V. 141, № 2. – P. 391-396.
42. Ashwar, B. A., Shah, A., Gani, A., Shah, U., Gani, A., Wani, I. A., ... & Masoodi, F. A. Rice starch active packaging films loaded with antioxidants—development and characterization // Starch-Stärke. – 2015. – V. 67, № 3-4. – P. 294-302.
43. Assaha, D. V., Ueda, A., Saneoka, H., Al-Yahyai, R., & Yaish, M. W. The role of Na⁺ and K⁺ transporters in salt stress adaptation in glycophytes. // Frontiers in physiology. – V. 8. – 2017. – P 509.

44. Barata-Soares A. D., Gomez M. L. P. A., de Mesquita C.H., Lajolo F. M. Ascorbic acid biosynthesis: a precursor study on plants. // Brazilian Journal of Plant Physiology. – 2004. – V. 16. – P. 147-154.
45. Beckman C. Phenolic-storing cells: Keys to programmed cell death and periderm formation in wilt disease resistance and in general defence responses in plants? // Physiological and molecular plant pathology. – 2000. – V. 57, № 3. – P. 101-110.
46. Bela K., Horváth E., Gallé Á., Szabados, L., Tari, I., & Csiszár, J. Plant glutathione peroxidases: emerging role of the antioxidant enzymes in plant development and stress responses // Journal of Plant Physiology. – 2015– V. 176 – P. 192-201.
47. Bendich A. Physiological Role of Antioxidants in the Immune System // Journal of Dairy Science. – 1993. – V. 76, № 9. – P. 2789-2794.
48. Benz M., Schink B., Brune A. Humic acid reduction by *Propionibacterium freudenreichii* and other fermenting bacteria // Applied and environmental microbiology. – 1998. – V. 64, № 11. – P. 4507-4512.
49. Berbara, R. L., García, A. C. Humic substances and plant defense metabolism // Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment – 2013 – V. 1 – P. 297-319
50. Bernstein N, Gorelick J, Zerahia R, Koch S. Impact of N, P, K, and humic acid supplementation on the chemical profile of medical cannabis (*Cannabis sativa* L) // Frontiers in plant science. – 2019 – V. 10 – P. 736.
51. Bezuglova O., Klimenko A. Application of Humic Substances in Agricultural Industry // Agronomy. – 2022. – V. 12, № 3. – P. 584.
52. Bezuglova, O. S., Polienko, E. A., Gorovtsov, A. V., Lyhman, V. A., & Pavlov, P. D. The effect of humic substances on winter wheat yield and fertility of ordinary chernozem // Annals of Agrarian Science. – 2017, №15. – P.239-242.
53. Bleier L, Dröse S. Superoxide generation by complex III: from mechanistic rationales to functional consequences // Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics. – 2013. – V. 1827, № 11-12. – P. 1320-1331.

54. Boligłowa E., Gleń K. Yielding and quality of potato tubers depending on the kind of organic fertilization and tillage method // Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. – 2003. – V. 6, № 1. – P. 1-8.
55. Boon, C. S., McClements, D. J., Weiss, J., & Decker, E. A. (2010). Factors influencing the chemical stability of carotenoids in foods // Critical reviews in food science and nutrition. – 2010. – V. 50, № 6. – P. 515-532.
56. Bian Q., Wang Ya., Chen, Qiao Sh., Hu L., Yin Yu, Yang X., Yang Yu. Effects of potassium application on yield and potassium balance of sweet potato field in China: A meta-analysis // Journal of Plant Nutrition and Fertilizers. – 2022. – V. 28, № 8. – P. 1509-1519.
57. Bravo L. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance // Nutrition reviews. – 1998. – V. 56, № 11. – P. 317-333.
58. Brown C.R. Antioxidants in potato // American journal of potato research. – 2005. – V. 82, № 2. – P. 163-172.
59. Brown C.R. Breeding for phytonutrient enhancement of potato //American Journal of Potato Research. – 2008. – V. 85, № 4. – P. 298-307.
60. Brown, C. R., Culley, D., Yang, C., Durst, R., & Wrolstad, R. Variation of anthocyanin and carotenoid contents and associated antioxidant values in potato breeding lines // Journal of the American Society for Horticultural Science. – 2005. – V. 130, №. 2. – P. 174-180.
61. Bulgari R., Cocetta G., Trivellini A., et al. Biostimulants and crop responses: a review // Biological Agriculture & Horticulture. – 2015. – V. 31, № 1. – P. 1–17.
62. Calvo P., Nelson L., Kloepper J.W. Agricultural uses of plant biostimulants // Plant Soil. – 2014. – V. 383, № 1–2. – P. 3–41.
63. Camin, F., Moschella, A., Miselli, F., Parisi, B., Versini, G., Ranalli, P., & Bagnaresi, P. Evaluation of markers for the traceability of potato tubers grown in an organic versus conventional regime // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2007. – V. 87, № 7. – P. 1330-1336.

64. Canellas L.P., Olivares F.L. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. – 2014. – V. 1, № 1. – P. 3.
65. Canellas LP, Olivares FL. Production of border cells and colonization of maize root tips by *Herbaspirillum seropedicae* are modulated by humic acid // Plant and soil. – 2017. – V. 417, № 1. – P. 403-413.
66. Canellas, L. P., Spaccini, R., Piccolo, A., Dobbss, L. B., Okorokova-Façanha, A. L., de Araújo Santos, G., Façanha, A. R. Relationships between chemical characteristics and root growth promotion of humic acids isolated from Brazilian oxisols //Soil Science. – 2009. – V. 174, № 11. – P. 611-620.
67. Chen Y., Stevenson F.J. Soil organic matter interactions with trace elements // The role of organic matter in modern agriculture. – Dordrecht: Springer Netherlands. – 1986. – P. 73-116.
68. Chu Y. H., Chang, C. L., & Hsu, H. F. Flavonoid content of several vegetables and their antioxidant activity // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2000. – V. 80, № 5. – P. 561-566.
69. Chun, O. K., Kim, D. O., Smith, N., Schroeder, D., Han, J. T., & Lee, C. Y. Daily consumption of phenolics and total antioxidant capacity from fruit and vegetables in the American diet // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2005. – V. 85, № 10. – P. 1715-1724.
70. Conlon, M. A., Kerr, C. A., McSweeney, C. S., Dunne, R. A., Shaw, J. M., Kang, S., Topping, D. L. Resistant starches protect against colonic DNA damage and alter microbiota and gene expression in rats fed a Western diet // The Journal of nutrition. – 2012. – V 142, № 5. – P. 832-840.
71. Cordeiro F.C., Santa-Catarina C., Silveira V., de Souza S.R. Humic acid effect on catalase activity and the generation of reactive oxygen species in corn (*Zea mays*) // Bioscience, biotechnology, and biochemistry. – 2011. – V. 75, № 1. – P. 70-74.
72. Cui J., Tcherkez G. Potassium dependency of enzymes in plant primary metabolism // Plant Physiology and Biochemistry. – 2021. – V. 166. – P. 522-530.

73. Damon M., Zhang, N. Z., Haytowitz, D. B., & Booth, S. L. Phylloquinone (vitamin K1) content of vegetables // Journal of Food Composition and Analysis. – 2005. – V. 18, № 8. – P. 751-758.
74. Danchin A, Nikel P.I. Why nature chose potassium // Journal of Molecular Evolution. – 2019. – V. 87, № 9. – P. 271-288.
75. Davey, M. W., Montagu, M. V., Inze, D., Sanmartin, M., Kanellis, A., Smirnoff, N., Fletcher, J. Plant L-ascorbic acid: chemistry, function, metabolism, bioavailability and effects of processing // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2000. – V. 80, № 7. – P. 825-860.
76. da Piedade M.A, Olivares F.L., Médici L.O., Torres-Neto A., Dobbss L.B., Canellas L.P. Mixed *rhizobia* and *Herbaspirillum seropedicae* inoculations with humic acid-like substances improve water-stress recovery in common beans // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. – 2017. – V. 4. № 1. – P. 6.
77. DellaPenna D., Pogson B. J. Vitamin synthesis in plants: tocopherols and carotenoids // Annu. Rev. Plant Biol. – 2006. – V. 57, № 1. – P. 711-738.
78. Delgado-Vargas F., Jiménez A. R., Paredes-López O. Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains—characteristics, biosynthesis, processing, and stability // Critical reviews in food science and nutrition. – 2000. – V. 40, № 3. – P. 173-289.
79. Den Besten G., Van Eunen K., Groen A. K., Venema K., Reijngoud D. J., Bakker B. M. The role of short-chain fatty acids in the interplay between diet, gut microbiota, and host energy metabolism // Journal of lipid research. – 2013. – V. 54, № 9. – P. 2325-2340
80. Dupuis J. H. Lu Z. H., Yada R. Y., & Liu Q. The effect of thermal processing and storage on the physicochemical properties and in vitro digestibility of potatoes // International Journal of Food Science and Technology. – 2016. – V. 51, № 10. – P. 2233-2241.
81. Eelderink, C., Schepers, M., Preston, T., Vonk, R. J., Oudhuis, L., & Priebe, M. G. Slowly and rapidly digestible starchy foods can elicit a similar glycemic

- response because of differential tissue glucose uptake in healthy men // The American journal of clinical nutrition. – 2012. – V. 96, № 5. – P. 1017-1024.
82. Emenaker N. J., Basson M. D. Integrin subunit activation modulates human colonic (Caco-2) epithelial proliferation and differentiation on a laminin matrix // Gastroenterology. – 1998. – V. 114. – P. A878.
83. Emenaker, N. J., Calaf, G. M., Cox, D., Basson, M. D., & Qureshi, N. Short-chain fatty acids inhibit invasive human colon cancer by modulating uPA, TIMP-1, TIMP-2, mutant p53, Bcl-2, Bax, p21 and PCNA protein expression in an in vitro cell culture model // The Journal of nutrition. – 2001. – V. 131, № 11. – P. 3041-3046.
84. Englyst H. N., Kingman S. M., Cummings J. H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions // European journal of clinical nutrition. – 1992. – T. 46. – P. 33-50.
85. Erhart E., Hartl W., Putz B. Biowaste compost affects yield, nitrogen supply during the vegetation period and crop quality of agricultural crops. // European Journal of Agronomy. – 2005 – V. 23, № 3. – P. 305-314.
86. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Potatoes yield at all countries data 2022. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (дата обращения 10.03.2023)
87. Fujimura Y., Katayama A., Kuwatsuka S. Inhibitory-action of dissolved humic substances on the growth of soil bacteria degrading DDT // Soil science and plant nutrition. – 1994. – V. 40, № 3. – P. 525-530.
88. García A., Berbara R., Farías L., Izquierdo F. G., Hernández O. L., Campos R. H., Castro R. N. et al. Humic acids of vermicompost as an ecological pathway to increase resistance of rice seedlings to water stress // African Journal of Biotechnology. – 2012. – V. 11, № 13. – P. 3125-3134.
89. Gill S. S., Anjum N. A., Hasanuzzaman M., Gill R., Trivedi D. K., Ahmad I., Tuteja N. Glutathione and glutathione reductase: a boon in disguise for plant abiotic stress defense operations // Plant Physiology and Biochemistry. – 2013. – V. 70. – P. 204-212.

90. Gill S.S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants // Plant physiology and biochemistry. – 2010. – V. 48, № 12. – P. 909-930.
91. Giovanni A., Azzarello L., Pollastri S., Tattini M. Flavonoids as antioxidants in plants: location and functional significance // Plant science. – 2012. – V. 196. – P. 67-76.
92. Goyer A., Navarre, D. A. Determination of folate concentrations in diverse potato germplasm using a trienzyme extraction and a microbiological assay // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2007. – V. 55, № 9. – P. 3523-3528.
93. Goyer, A., Navarre, D. A. Folate is higher in developmentally younger potato tubers // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2009. – T. 89, № 4. – P. 579-583.
94. Gugała M., Zarzecka K. Effect of insecticides on phosphorus and potassium content in tubers of three potato cultivars // Journal of Elementology. – 2011. – V. 16, № 1. – P. 43–50
95. Gustavsen G.W. Sustainability and potato consumption // Potato Research. – 2021. – V. 64, № 4. – P. 571-586.
96. Hasanuzzaman M., Bhuyan B.M. H. M., Nahar K., Hossain M. Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses // Agronomy. – 2018. – V. 8, № 3. – P. 31.
97. Hassan H., Suleiman S., Dai M., Suleiman S., Dais M. Effect of potassium humate spray on some biochemical characteristics in potato leaves *Solanum tuberosum* under water stress conditions // Baghdad Science Journal. – 2024. – V. 21, № 5. – P. 1483-1483.
98. Hassett D.J., Bise M.S.I., Hartenstein R. Bactericidal action of humic acids // Soil Biology & Biochemistry. – 1987. – V. 19, № 1. – P. 111-113
99. Hajšlová, J., Schulzova, V., Slanina, P., Janne, K., Hellenäs, K. E., & Andersson, C. H. Quality of organically and conventionally grown potatoes: Four-year study of micronutrients, metals, secondary metabolites, enzymic browning and

- organoleptic properties // Food additives and contaminants. – 2005. – V. 22, № 6. – P. 514-534.
100. Heaton S. Organic farming, food quality and human health: A review of the evidence. – Bristol: Soil Association, 2001. – P. 38-39.
101. Higgins J. A. Resistant starch and energy balance: impact on weight loss and maintenance // Critical reviews in food science and nutrition. – 2014. – V. 54, № 9. – P. 1158-1166.
102. Hamouz K., Čepl J., Dvořák P. Influence of environmental conditions on the quality of potato tubers // Horticultural Science. – 2005. – V. 32, № 3. – P. 89-95.
103. Huang Z, Zeng Z, Song Z, Chen A, Zeng G, Xiao R, He K, Yuan L, Li H, Chen G. Antimicrobial efficacy and mechanisms of silver nanoparticles against *Phanerochaete chrysosporium* in the presence of common electrolytes and humic acid // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – V. 383. – P. 121153.
104. Ignat I, Volf I, Popa V.I. A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables // Food chemistry. – 2011. – V. 126, № 4. – P. 1821-1835.
105. Jiang Q. Natural forms of vitamin E: metabolism, antioxidant, and anti-inflammatory activities and their role in disease prevention and therapy // Free Radical Biology and Medicine. – 2014. – V. 72. – P. 76-90.
106. James A. M., Smith R. A., Murphy M. P. Antioxidant and prooxidant properties of mitochondrial Coenzyme Q // Archives of biochemistry and biophysics. – 2004. – V. 423, № 1. – P. 47-56.
107. Jansen G., Flamme W. Coloured potatoes (*Solanum tuberosum* L.)—anthocyanin content and tuber quality // Genetic Resources and Crop Evolution. – 2006. – V. 53, № 7. – P. 1321-1331.
108. Jardin, P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation // Scientia horticulturae. – 2015. – V. 196. – P. 3-14.
109. Johnson R., Vishwakarma K., Hossen S., Kumar V. et al. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance // Plant Physiology and Biochemistry. – 2022. – V. 172. – P. 56-69.

110. Khadim R. M., Al-Fartusie F. S. Antioxidant vitamins and their effect on immune system // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1853. – №. 1. – P. 012065.
111. Klikocka H., Główacka A. Does the sulphur fertilization modify magnesium and calcium content in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.)? // Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus. – 2013. – V. 12, № 5. – P. 41-53.
112. Klöcking R, Helbig B. Humic substances, medical aspects and applications of // Biopolymers Online: Biology• Chemistry• Biotechnology• Applications. – 2005. – V. 1.
113. Konings, E. J., Roomans, H. H., Dorant, E., Goldbohm, R. A., Saris, W. H., & van den Brandt, P. A. Folate intake of the Dutch population according to newly established liquid chromatography data for foods. // The American Journal of Clinical Nutrition. – 2001. – V. 73. – P. 765–776.
114. Kotikova, Z., Hejtmankova, A., Lachman, J., Hamouz, K., Trnkova, E., & Dvorak, P. Effect of selected factors on total carotenoid content in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). // Plant Soil Environment – 2007. – V. 53. – P. 355–360.
115. Kumar P., Kumar T., Singh S., Tuteja N., Prasad R., Singh. J Potassium: A key modulator for cell homeostasis // Journal of Biotechnology. – 2020. – V. 324. – P. 198-210.
116. Lairon, D. The quality of products of organic farming. // Agronomic Innovations. – 2009. – V. 4. – P. 281-287
117. Larson, R. A. The antioxidants of higher plants. // Phytochemistry. – 1988 – V. 27, № 4 – P. 969-978.
118. Lazzarini, R., Müller, M. M., Lazzarini, P. R. C., Tamanini, C., Matos, C. K. D., Kawakami, J. Humic substances: effects on potato growth and yield // Horticultura Brasileira. – 2022. – V. 40, № 1. – P. 33-38.
119. Le Blay G.M., Michel C.D., Blottière H.M., Cherbut C.J. Raw potato starch and short-chain fructo-oligosaccharides affect the composition and metabolic activity of rat intestinal microbiota differently depending on the caecocolonic

- segment involved //Journal of applied microbiology // Journal of applied microbiology. – 2003. – V. 94. – №. 2. – P. 312-320.
120. Lemos M., Aliyu M., Hungerford G. Influence of cooking on the levels of bioactive compounds in Purple Majesty potato observed via chemical and spectroscopic means // Food Chemistry. – 2015. – V. 173. – P. 462-467.
121. Leone A., Longo C., Lombardi D. A., Raimo F., and Zacheo G. Antioxidant Compounds and Antioxidant Activity in “Early Potatoes” // Journal of agricultural and food chemistry. – 2008. – V. 56, № 11. – P. 4154-4163.
122. Lewis C. E., Walker, J. R. L., Lancaster, J. E. Changes in anthocyanin, flavonoid and phenolic acid concentrations during development and storage of coloured potato (*Solanum tuberosum* L) tubers // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 1999. – V 79, № 2. – P. 311-316
123. Lewis C. E., Walker J. R. L., Lancaster J. E., Sutton K. H. Determination of anthocyanins, flavonoids and phenolic acids in potatoes. I: Coloured cultivars of *Solanum tuberosum* L // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 1998. – V. 77, № 1. – P. 45-57.
124. Liang X., Zhang L., Natarajan S.K., Becker D.F. Proline mechanisms of stress survival // Antioxidants & redox signaling. – 2013. – V. 19, № 9. – P. 998-1011.
125. Lukaszewicz M., Matysiak-Kata I., Skala J., Fecka I., Cisowski W., Szopa J. Antioxidant capacity manipulation in transgenic potato tuber by changes in phenolic compounds content // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2004. – V. 52, № 6. – P. 1526-1533.
126. Maggio, A., Carillo, P., Bulmetti, G. S., Fuggi, A., Barbieri, G., & De Pascale, S. Potato yield and metabolic profiling under conventional and organic farming. // European Journal of Agronomy. – 2008 – V. 28, № 3. – P. 343-350.
127. Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Remesy, C., & Jimenez, L. Polyphenols: food sources and bioavailability // The American journal of clinical nutrition. – 2004. – V. 79, № 5. – P. 727-747.

128. Marinova G., Batchvarov V. Evaluation of the methods for determination of the free radical scavenging activity by DPPH // Bulcarian J. of Agricultural Science – 2011 – V. 17, № 1 – P.11-24
129. Martins J. D. L., Soratto R. P., Fernandes A. M. The effect of humic substances and phosphate fertilizer on growth and nutrient uptake of the potato // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2020. – V. 51, № 11. – P. 1525-1544.
130. Mattila P., Hellstrom J. Phenolic acids in potatoes, vegetables, and some of their products // Journal of Food Composition and Analysis. – 2007. – V. 20, № 3-4. – P. 152-160.
131. Melo B. A. G., Motta F. L., Santana M. H. A. Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments // Materials Science and Engineering: C. – 2016. – V. 62. – P. 967-974.
132. Mensor L.L., Menezes F.S., Leitão G.G., Reis A.S., Santos T.C.D., Coube C.S., Leitão S.G. Screening of Brazilian plant extracts for antioxidant activity by the use of DPPH free radical method // Phytotherapy research. – 2001. – V. 15, № 2. – P. 127-130
133. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // Trends in plant science. – 2002. – V. 7, №. 9. – P. 405-410
134. Monda H., Cozzolino V., Vinci G., Drosos M., Savy D., Piccolo A. Molecular composition of the Humeome extracted from different green composts and their biostimulation on early growth of maize // Plant and Soil. – 2018. – V. 429, №. 1. – P. 407-424.
135. Monda H, Cozzolino V, Vinci G, Spaccini R, Piccolo A. Molecular characteristics of water-extractable organic matter from different composted biomasses and their effects on seed germination and early growth of maize // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 590. – P. 40-49.
136. Moschella A., Camin F., Miselli F., Parisi B., Versini G., Ranalli P., Bagnaresi P. Markers of characterization of agricultural regime and geographical origin in potato // Agroindustria. – 2005. – V. 4, № 3. – P. 325-332.

137. Nardi S., Carletti P., Pizzeghelli D., Muscolo A. Biological activities of humic substances // Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems. – 2009. – V. 2. – №. 1. – P. 305-339.
138. Nardi S., Pizzeghelli D. Physiological effects of humic substances on higher plants // Soil Biology and Biochemistry. – 2002. – V. 34, № 11. – P. 1527-1536.
139. Navarre D. A., Goyer A., Shakya R. Nutritional value of potatoes: vitamin, phytonutrient, and mineral content // Advances in potato chemistry and technology. – Academic Press – 2009. – P. 395-424.
140. Navarre D. A., Shakya R., Holden M., Kumar S. The effect of different cooking methods on phenolics and vitamin C in developmentally young potato tubers // American Journal of Potato Research. – 2010. – V. 87, № 4. – P. 350-359.
141. Parr A., Bolwell G. Phenols in the plant and in man. The potential for possible nutritional enhancement of the diet by modifying the phenols content or profile // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2000. – V. 80, № 7. – P. 985-1012.
142. Patel A., Gurjar P. K. S., Patel P. Study on the effect of organic manures and biofertilizers on growth, yield, and quality of Potato (*Solanum tuberosum* L.) // The Pharma Innovation Journal. – 2022. – V. 11, № 2. – P. 507-11.
143. Perez-Jimenez J., Aranz S., Tabernero M., Diaz-Rubio M.E., Serrano J., Goni I., Saura-Calixto F. Updated methodology to determine antioxidant capacity in plant foods, oils and beverages: extraction, measurement and expression of results // Food Research International. – 2008. – V. 41, № 3. – P. 274-285.
144. Perez-Jimenez J., Saura-Calixto F. Antioxidant capacity of dietary polyphenols determined by ABTS assay: a kinetic expression of the results // J. of Food Science and Technology – 2008. – V. 43 – P. 185-191.
145. Pignocchi C., Foyer C. H. Apoplastic ascorbate metabolism and its role in the regulation of cell signalling // Current opinion in plant biology. – 2003. – V. 6, № 4. – P. 379-389.

146. Pravst I., Žmitek K., Žmitek J. Coenzyme Q10 contents in foods and fortification strategies // Critical reviews in food science and nutrition. – 2010. – V. 50, № 4. – P. 269-280
147. Re N. Pellegrini A., Proteggente., et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. // Free radical biology and medicine. – 1999. – V. 26, № 9-10. – P. 1231-1237.
148. Rembiałkowska E. Comparison of the contents of nitrates, nitrites, lead, cadmium and vitamin C in potatoes from conventional and ecological farms. // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences – 1999 – V. 8, № 4 – P. 17-26.
149. Rembiałkowska E. Quality of plant products from organic agriculture // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2007. – V. 87, №. 15. – P. 2757-2762.
150. Reyes L. F., Miller J. C., Cisneros-Zevallos L. Environmental conditions influence the content and yield of anthocyanins and total phenolics in purple-and red-flesh potatoes during tuber development // American Journal of Potato Research. – 2004. – V. 81, № 3. – P. 187-193.
151. Rimmer D.L. Free radicals, antioxidants, and soil organic matter recalcitrance // European journal of soil science. – 2006. – V. 57, № 2. – P. 91-94.
152. Rivero R.C., Suarez P.S., Rodriguez E.M., Martin J.D., Romara C.D. Mineral concentrations in cultivars of potatoes // Food Chemistry. – 2003. – V. 83, № 2. – P. 247-253.
153. Rockström J., Williams J., Daily G., Noble A., Matthews N., Gordon L., Smith, J. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability // Ambio. – 2017. – V. 46, № 1. – P. 4-17.
154. Rodríguez-Cabezas M. E., Camuesco D., Arribas B., Garrido-Mesa N., Comalada M., Bailón E., Cueto-Sola M., Utrilla P., Guerra-Hernández E., Pérez-Roca C., Gálvez J., Zarzuelo A. The combination of fructooligosaccharides and resistant starch shows prebiotic additive effects in rats // Clinical nutrition. – 2010. – V. 29, № 6. – P. 832-839.

155. Roush Y., Colla G. Biostimulants in agriculture // Frontiers in plant science. – 2020. – V. 11. – P. 40.
156. Rytel E., Tajner-Czopek A., Kita A., Aniołowska M., Kucharska A., Sokół-Łętowska A., Hamouz K. Content of polyphenols in coloured and yellow fleshed potatoes during dices processing. // Food Chemistry. – 2014. – V. 161. – P. 224-229.
157. Sardans J., Peñuelas J. Potassium Control of Plant Functions: Ecological and Agricultural Implications // Plants – 2021. – V. 10, № 2. – P. 419.
158. Sanyal, S. K., Rajashekhar, G., Kishor, P. K., Kumar, S. A., Kumari, P. H., Saritha, K. V. Role of protein phosphatases in signaling, potassium transport, and abiotic stress responses // Protein phosphatases and stress management in plants: Functional genomic perspective. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 203-232.
159. Siddiqui Y., Meon S., Ismail R., et al. In vitro fungicidal activity of humic acid fraction from oil palm compost // Int. J. Agric. Biol. – 2009. – V.11. – P. 448-452.
160. Sulaiman M., Hamzat I. T., Bashir M. A. An overview of natural plant antioxidants: analysis and evaluation // Advances in Biochemistry. – 2013. – V.1, № 4 – P. 64-72.
161. Suzuki N., Koussevitzky S., Mittler R. ROS and redox signalling in the response of plants to abiotic stress // Plant Cell Environ. – 2012 – V.35, № 2.– P. 259–270.
162. Tirumalai M. R., Rivas M., Tran Q., Fox G. E. The peptidyl transferase center: a window to the past. // Microbiology and Molecular Biology Reviews. – 2021. – V. 85, № 4. – P. e00104-21.
163. Trevisan, S., Francioso, O., Quaggiotti, S., & Nardi, S. Humic substances biological activity at the plant-soil interface: from environmental aspects to molecular factors // Plant signaling & behavior. – 2010. – V. 5, № 6. – P. 635-643.

164. Triantaphylidès C., Havaux, M. Singlet oxygen in plants: production, detoxification and signaling // Trends in plant science. – 2009. – V. 14, № 4. – P. 219-228.
165. Valcarcel J., Reilly K., Gaffney M., O'Brien N. Antioxidant activity, total phenolic and total flavonoid content in sixty varieties of potato (*Solanum tuberosum* L.) grown in Ireland // Potato research. – 2015. – V. 58, № 3. – P. 221-244.
166. Verrillo M., Salzano M., Savy D., Meo V. D., Valentini M., Cozzolino V., Piccolo A. Antibacterial and antioxidant properties of humic substances from composted agricultural biomasses // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. – 2022. – V. 9, № 1. – P. 28.
167. Wheeler G.L., Jones M.A., Smirnoff N. The biosynthetic pathway of vitamin C in higher plants // Nature. – 1998. – V. 393. – № 6683. – P. 365-369.
168. Wszelaki A. L., Delwiche J. F., Walker S. D., Liggett R. E., Scheerens J. C., Kleinhenz M. D. Sensory quality and mineral and glycoalkaloid concentrations in organically and conventionally grown redskin potatoes (*Solanum tuberosum*). // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2005. – V. 85, № 5. – P. 720-726.
169. Yalman V., Laçin N.T. Development of humic acid and alginate-based wound dressing and evaluation on inflammation // Materials Technology. – 2019. – V. 34, № 12. – P. 705-717.
170. Ze Xiaolei, Sylvia H. Duncan, Petra Louis, Harry J Flint. *Ruminococcus bromii* is a keystone species for the degradation of resistant starch in the human colon // The ISME journal. – 2012. – V. 6, № 8. – P. 1535-1543.
171. Zhernov Y.V., Konstantinov A.I., Zhrebker A., Nikolaev E., Orlov A., Savinykh I., Kornilaeva G.V., Karamov E.V., Perminova I.V. Antiviral activity of natural humic substances and shilajit materials against HIV-1: relation to structure // Environmental research. – 2021. – V. 193. – P. 110312.

Приложения



Рисунок П.1. Закладка полевого опыта на территории Чашниково МГУ имени М.В. Ломоносова в 2019 г.



Рисунок П.2. Закладка полевого опыта на территории Чашниково МГУ имени М.В. Ломоносова в 2021 г. Использовали тот же участок.



Рисунок П.3. Закладка полевого опыта на территории Чашниково МГУ имени М.В. Ломоносова в 2022 г. Использовали тот же участок.

Таблица П. 1. Урожайность и её изменения, относительно контроля в 2019 году.

Вариант опыта	Без учёта потерь			С учётом потерь			ФО* кг/кг д.в.	
	Урожайность	Прибавка урожайности		Урожайность	Прибавка урожайности			
		т/га	%		т/га	%		
1NPK	67,2	-	-	36,4	-	-	-	
2NPK	77	9,8	14,6	49,6	13,2	36,2	51/69	
2NPK + K	75,7	8,5	12,6	51,2	14,8	40,7	33/58	
1NPK + Гумистар	72,8	5,6	8,3	53,2	16,8	46,2	58/175	
2NPK + Гумистар	77,8	10,7	15,8	56,7	20,3	55,8	56/106	

$\text{НСР}_{0,05}$ без учёта потерь = 8,7 т/га. $\text{НСР}_{0,05}$ с учётом потерь = 3,54 т/га

Таблица П. 2. Урожайность (т/га) и её изменения, относительно контроля в 2021 году.

Вариант опыта	Без учёта потерь			С учётом потерь			ФО* кг/кг д.в.	
	Урожайность	Прибавка урожайности		Урожайность	Прибавка урожайности			
		т/га	%		т/га	%		
1NPK	53,8	-	-	23,7	-	-	-	
2NPK	48,2	-5,6	-10	20,8	-2,9	-12	-29/-15	
2NPK + K	54,5	0,7	1,3	22,5	-1,3	-5,1	3/-5	
1NPK + Гумистар	67,1	13,3	24,7	33,1	9,4	39,7	139/98	
2NPK + Гумистар	64,7	10,9	20,3	28,1	4,3	18,6	57/22	
1NPK + БиоГумат	65,9	12,1	22,5	26,5	2,7	11,8	126/28	
2NPK + БиоГумат	70,4	16,5	30,9	30,3	6,6	27,8	86/34	

$\text{НСР}_{0,05}$ без учёта потерь = 10,6 т/га. $\text{НСР}_{0,05}$ с учётом потерь = 5,8 т/га.

Таблица П. 3. Урожайность и её изменения, относительно контроля в 2022 году.

Вариант опыта	Без учёта потерь			С учётом потерь			ФО* кг/кг д.в.	
	Урожайность	Прибавка урожайности		Урожайность	Прибавка урожайности			
		т/га	%		т/га	%		
1NPK	38,2	-	-	16,5	-	-	-	
2NPK	32,7	-5,5	-14	10,2	-6,3	-38	-29/ -33	
2NPK + K	22,4	-16	-41	12,7	-3,8	-23	-68/ -15	
1NPK + Гумистар	38,7	0,5	1,3	19,7	3,2	19,4	5/33	
2NPK + Гумистар	34,8	-3,4	-8,9	18,7	2,2	13,3	-18/ 11	
1NPK + БиоГумат	36,2	-2	-5,2	18,2	1,7	10,3	-21/ 18	
2NPK + БиоГумат	34,7	-3,5	-9,1	17,5	1	6,1	-18/5	

$HCP_{0,05}$ без учёта потерь = 6,1 т/га. $HCP_{0,05}$ с учётом потерь = 3,1 т/га.

Таблица П. 4. Содержание фосфора и калия в клубнях картофеля по вариантам опыта в годы исследования.

Год	Вариант	P_2O_5		K_2O	
		% сухого вещества			
		Среднее по варианту	$HCP_{0,05}$	Среднее по варианту	$HCP_{0,05}$
2019	1NPK	1,57	0,06	4,61	0,17
2019	2NPK	1,65		5,06	
2019	2NPK + K	1,73		5,38	
2019	1NPK + Гумистар	1,85		5,45	
2019	2NPK + Гумистар	1,63		4,90	
2021	1NPK	0,89	0,11	4,21	0,11
2021	2NPK	0,99		4,58	
2021	2NPK + K	1,05		4,79	
2021	1NPK + Гумистар	1,09		4,78	
2021	2NPK + Гумистар	1,16		5,00	
2021	1NPK + БиоГумат	1,09		4,61	
2021	2NPK + БиоГумат	1,07		4,58	
2022	1NPK	1,04	0,23	4,07	0,66
2022	2NPK	0,75		4,66	
2022	2NPK + K	0,48		4,87	
2022	1NPK + Гумистар	0,47		4,78	
2022	2NPK + Гумистар	0,59		4,59	
2022	1NPK + БиоГумат	0,70		3,89	
2022	2NPK + БиоГумат	0,58		5,65	

Таблица П. 5. Содержание азота общего, белкового и нитратов в клубнях картофеля по вариантам опыта в годы исследования.

Год	Вариант	N общий		N белковый		NO ₃ ⁻	
		Среднее по варианту	HCP _{0,05}	Среднее по варианту	HCP _{0,05}	Среднее по варианту	HCP _{0,05}
2019	1NPK	3,26	0,18	1,56	0,17	51,53	27,84
	2NPK	3,47		1,87		43,53	
	2NPK + К	3,12		1,67		52,87	
	1NPK + Гумистар	3,54		1,44		100,43	
	2NPK + Гумистар	2,95		1,92		56,73	
	1NPK	2,40		1,41		54,90	
2021	2NPK	3,12	0,17	1,20	0,18	150,03	24,94
	2NPK + К	2,34		1,55		126,21	
	1NPK + Гумистар	2,79		1,86		43,45	
	2NPK + Гумистар	3,00		1,95		46,55	
	1NPK + БиоГумат	2,60		1,61		85,55	
	2NPK + БиоГумат	2,70		1,68		63,50	
2022	1NPK	1,84	0,31	0,97	0,20	86,74	11,73
	2NPK	2,10		1,25		38,74	
	2NPK + К	2,53		1,40		40,52	
	1NPK + Гумистар	3,24		1,63		41,41	
	2NPK + Гумистар	2,42		1,45		52,06	
	1NPK + БиоГумат	3,04		1,49		57,55	
2022	2NPK + БиоГумат	2,85		1,46		37,97	

Таблица П.6. Показатели содержания витамина С и АО активности в клубнях картофеля по вариантам опыта в годы исследования

Год	Вариант	Витамин С, мг/100 г сырого вещества		Степень ингибиования ДФПГ, % в сухом веществе	
		Среднее по варианту	HCP _{0,05}	Среднее по варианту	HCP _{0,05}
2019	1NPK	5,73	1,94	22,86	4,32
2019	2NPK	7,83		30,10	
2019	2NPK + К	10,09		29,96	
2019	1NPK + Гумистар	8,06		33,77	
2019	2NPK + Гумистар	7,28		30,52	
2021	1NPK	3,01	0,53	30,43	0,73
2021	2NPK	2,56		30,29	
2021	2NPK + К	3,68		30,19	
2021	1NPK + Гумистар	4,34		30,01	
2021	2NPK + Гумистар	5,39		29,96	
2021	1NPK + БиоГумат	4,14		29,96	
2021	2NPK + БиоГумат	4,16		30,19	
2022	1NPK	4,30	0,75	25,58	1,74
2022	2NPK	5,83		30,99	
2022	2NPK + К	6,00		31,99	
2022	1NPK + Гумистар	8,09		32,81	
2022	2NPK + Гумистар	7,49		30,94	
2022	1NPK + БиоГумат	4,50		28,89	
2022	2NPK + БиоГумат	7,13		32,04	

Таблица П. 7. Показатели содержания крахмала и резистентного крахмала в клубнях картофеля по вариантам опыта в годы исследования.

Год	Вариант	Крахмал		РК	
		% сухого вещества			
		Среднее по варианту	HCP _{0,05}	Среднее по варианту	HCP _{0,05}
2019	1NPK	55,73	1,62	28,50	0,82
	2NPK	59,90		30,82	
	2NPK + K	58,80		28,24	
	1NPK + Гумистар	60,90		29,92	
	2NPK + Гумистар	63,40		31,53	
2021	1NPK	55,31	0,74	28,68	0,39
	2NPK	55,40		27,97	
	2NPK + K	56,23		27,96	
	1NPK + Гумистар	57,20		28,90	
	2NPK + Гумистар	55,50		28,15	
	1NPK + БиоГумат	54,10		27,30	
	2NPK + БиоГумат	53,38		26,98	
2022	1NPK	68,70	1,06	30,03	1,8
	2NPK	69,91		30,03	
	2NPK + K	68,22		29,03	
	1NPK + Гумистар	72,50		31,80	
	2NPK + Гумистар	69,68		31,62	
	1NPK + БиоГумат	77,21		34,70	
	2NPK + БиоГумат	72,70		31,93	

Таблица П 8. Оценка влияния основных факторов выращивания (метеоусловий и удобрений) на картофель, по годам исследования и совокупно.

Факторы	2019 год		2021		2022		Оценка совокупного влияния за 3 года полевого опыта		
	Влияние NPK	Влияние ГП	Влияние NPK	Влияние ГП	Влияние NPK	Влияние ГП	Влияние ГТК	Влияние NPK	Влияние ГП
P ₂ O ₅ , % сухого вещества	-0,21 нр	0,57 *	0,23 нр	0,65 **	-0,33 нр	-0,48 *	-0,93 ***	-0,03 нр	-0,20 нр
K ₂ O, % сухого вещества	0,13 нр	0,48 нр	0,43 нр	0,40 нр	0,58 **	0,23 нр	-0,35 **	0,39 **	0,17 нр
N общий, % сухого вещества	-0,47 нр	-0,24 нр	0,35 нр	0,02 нр	-0,24 нр	0,81 ***	-0,58 ***	-0,06 нр	0,17 нр
N белковый, % сухого вещества	0,81 ***	-0,08 нр	-0,06 нр	0,66 ***	0,06 нр	0,70 ***	-0,49 ***	0,16 нр	0,38 **
NO ₃ ⁻ , мг/100г	-0,42 нр	0,48 нр	0,40 нр	-0,40 нр	-0,58 ***	-0,32 нр	-0,15 нр	-0,01 нр	-0,15 нр
AO активность	0,23 нр	0,64 **	0,04 нр	-0,33 нр	0,49 *	0,36 нр	0,15 нр	0,26 нр	0,35 **

Витамин С, мг/100г	0,36 нр	0,20 нр	0,06 нр	0,67 ***	0,33 нр	0,32 нр	-0,22 нр	0,20 нр	0,10 нр
Крахмал, % сухого вещества	0,41 нр	0,69 **	-0,16 нр	-0,40 нр	-0,41 нр	0,68 ***	0,67 ***	-0,04 нр	0,19 нр
РК, % сухого вещества	0,34 нр	0,33 нр	-0,37 нр	-0,51 *	-0,39 нр	0,72 ***	0,35 **	-0,12 нр	0,23 нр
Масса товарного картофеля, т/га	0,32 нр	0,51 нр	-0,20 нр	0,53 *	-0,45 нр	0,60 **	-0,86 ***	0,01 нр	0,03 нр

* - r-критерий ниже 0,1; ** - r-критерий ниже 0,05; *** - r-критерий ниже 0,01; нр - несущественные различия (r-критерий выше 0,1). ГП – гуминовые препараты; ГТК – гидротермический коэффициент.

Таблица П 9. Корреляционный анализ данных в 2019 году.

Факторы	P ₂ O ₅	K ₂ O	N, общий	N, белковый	NO ₃ ⁻ , мг/100г	АО активность, %	Витамин C, мг/100г	Kрахмал	РК	Масса товарного, картофеля, т/га
	% сухого вещества							% сухого вещества		
Влияние NPK	-0,21 нр	0,13 нр	-0,47 нр	0,81 ***	-0,42 нр	0,23 нр	0,38 нр	0,41 нр	0,34 нр	0,32 нр
Влияние ГП	0,57 *	0,48 нр	-0,24 нр	-0,08 нр	0,48 нр	0,64 **	0,20 нр	0,69 **	0,33 нр	0,51 нр
P ₂ O ₅ , % сухого вещества	1	0,92 ***	0,49 нр	-0,48 нр	0,52 нр	0,77 **	0,38 нр	0,23 нр	-0,10 нр	0,23 нр
K ₂ O, % сухого вещества		1	0,36 нр	-0,22 нр	0,35 нр	0,81 **	0,51 нр	0,25 нр	-0,12 нр	0,27 нр
N общий, % сухого вещества			1	-0,37 нр	0,24 нр	0,29 нр	-0,13 нр	-0,32 нр	-0,16 нр	-0,24 нр
N белковый, % сухого вещества				1	-0,46 нр	0,11 нр	-0,11 нр	0,28 нр	0,42 нр	0,12 нр
NO ₃ ⁻ , мг/100г					1	0,44 нр	0,04 нр	0,21 нр	0,03 нр	0,57 *

АО активность, %		1	0,16 нр	0,53 нр	0,28 нр	0,44 нр
Витамин С, мг/100г			1	0,27 нр	-0,02 нр	0,40 нр
Крахмал, % сухого вещества				1	0,83 ***	0,71 **
РК, % сухого вещества					1	0,62 *
Масса товарного картофеля, т/га						1

* - r-критерий ниже 0,1; ** - r-критерий ниже 0,05; *** - r-критерий ниже 0,01; нр - несущественные различия (r-критерий выше 0,1).

Таблица П 10. Корреляционный анализ данных за 2021 год.

Факторы	P ₂ O ₅	K ₂ O	N, общий	N, белковый	NO ₃ ⁻ , мг/100г	АО активность, %	Витамин C, мг/100г	Крахмал	РК	Масса товарного, картофеля, т/га
	% сухого вещества									
Влияние NPK	0,23 нр	0,43 нр	0,35 нр	-0,06 нр	0,40 нр	0,04 нр	0,06 нр	-0,16 нр	-0,37 нр	-0,21 нр
Влияние ГП	0,65 **	0,41 нр	0,02 нр	0,66***	-0,40 нр	-0,33 нр	0,67 ***	-0,40 нр	-0,51 *	0,53 *
P ₂ O ₅ , % сухого вещества	1	0,85 ***	0,33 нр	0,77 ***	-0,24 нр	-0,12 нр	0,58 **	-0,02 нр	-0,17 нр	0,35 нр
K ₂ O, % сухого вещества		1	0,39 нр	0,67 ***	-0,08 нр	-0,32 нр	0,62 **	0,28 нр	-0,02 нр	0,24 нр
N общий, % сухого вещества			1	0,11 нр	0,06 нр	-0,15 нр	0,16 нр	0,01 нр	-0,01 нр	0,09 нр
N белковый, % сухого вещества				1	-0,67 ***	-0,20 нр	0,85 ***	0,12 нр	0,09 нр	0,62 **
NO ₃ ⁻ , мг/100г					1	-0,005 нр	-0,51 *	-0,12 нр	-0,31 нр	-0,67 ***

АО активность, %	1	-0,41 нр	0,06 нр	0,29 нр	-0,06 нр
Витамин С, мг/100г		1	-0,04 нр	-0,15 нр	0,44 нр
Крахмал, % сухого вещества			1	0,87 ***	0,30 нр
РК, % сухого вещества				1	0,28 нр
Масса товарного картофеля, т/га					1

* - r-критерий ниже 0,1; ** - r-критерий ниже 0,05; *** - r-критерий ниже 0,01; нр - несущественные различия (r-критерий выше 0,1).

Таблица П 11. Корреляционный анализ данных за 2022 год.

Факторы	P ₂ O ₅	K ₂ O	N, общий	N, белковый	NO ₃ ⁻ , мг/100г	АО активность, %	Витамин C, мг/100г	Kрахмал	РК	Масса товарного, картофеля, т/га
	% сухого вещества							% сухого вещества		
Влияние NPK	-0,33 нр	0,58 **	-0,24 нр	0,06 нр	-0,58 **	0,49 *	0,33 нр	-0,41 нр	-0,39 нр	-0,45 нр
Влияние ГП	-0,48 *	0,23 нр	0,81 ***	0,71 ***	-0,32 нр	0,36 нр	0,32 нр	0,68 ***	0,72 ***	0,60 **
P ₂ O ₅ , % сухого вещества	1	-0,38 нр	-0,58 **	-0,64 **	0,77 ***	-0,77 ***	-0,56 **	0,02 нр	0,05 нр	-0,10 нр
K ₂ O, % сухого вещества		1	0,26 нр	0,43 нр	-0,60 **	0,66 **	0,61 **	-0,03 нр	-0,11 нр	-0,03 нр
N общий, % сухого вещества			1	0,85 ***	-0,50 *	0,54 **	0,42 нр	0,69 ***	0,62 **	0,51 *
N белковый, % сухого вещества				1	-0,63 **	0,73 ***	0,62 **	0,59 **	0,56 **	0,37 нр

NO ₃ ⁻ , мг/100г		1	-0,90 ***	-0,61 **	-0,08 нр	0,02 нр	0,25 нр
АО активность, %			1	0,80 ***	0,02 нр	-0,06 нр	-0,11 нр
Витамин С, мг/100г				1	-0,05 нр	0,01 нр	0,10 нр
Крахмал, % сухого вещества					1	0,95 ***	0,42 нр
РК, % сухого вещества						1	0,53 **
Масса товарного картофеля, т/га							1

* - r-критерий ниже 0,1; ** - r-критерий ниже 0,05; *** - r-критерий ниже 0,01; нр - несущественные различия (r-критерий выше 0,1).

Таблица П 12. Корреляционный анализ совокупного влияния факторов за 3 года наблюдения.

Факторы	P ₂ O ₅	K ₂ O	N, общий	N, белковый	NO ₃ ⁻ , мг/100г	АО активность, %	Витамин С, мг/100г	Kрахмал	РК	Масса товарного, картофеля, т/га
	% сухого вещества							% сухого вещества		
ГТК года	-0,93 ***	-0,35 **	-0,58 ***	-0,49 ***	-0,15 нр	0,15 нр	-0,22 нр	0,67 ***	0,35 **	-0,86 ***
Влияние NPK	-0,03 нр	0,39 **	-0,06 нр	0,16 нр	-0,01 нр	0,26 нр	0,20 нр	-0,04 нр	-0,12 нр	0,01 нр
Влияние ГП	-0,20 нр	0,17 нр	0,17 нр	0,38 **	-0,15 нр	0,35 **	0,11 нр	0,19 нр	0,23 нр	0,03 нр
P ₂ O ₅ , % сухого вещества	1	0,35 **	0,49 ***	0,38 **	0,16 нр	-0,20 нр	0,28 *	-0,53 ***	-0,25 нр	0,85 ***
K ₂ O, % сухого вещества		1	0,46 ***	0,40 **	-0,13 нр	0,45 ***	0,57 ***	-0,07 нр	-0,06 нр	0,39 **
N общий, % сухого вещества			1	0,51 ***	-0,04 нр	0,16 нр	0,40 **	-0,14 нр	0,15 нр	0,58 ***

N белковый, % сухого вещества		1	-0,34 **	0,16 нр	0,26 нр	-0,31 *	-0,03 нр	0,53 ***
NO ₃ ⁻ , мг/100г		1	-0,01 нр	-0,38 **	-0,33 **	-0,31 *	0,04 нр	
AO активность , %			1	0,18 нр	0,16 нр	0,10 нр	-0,02 нр	
Витамин C, мг/100г				1	0,32 **	0,33 **	0,44 ***	
Крахмал, % сухого вещества					1	0,86 ***	-0,37 **	
РК, % сухого вещества						1	-0,04 нр	
Масса товарного картофеля, т/га							1	

* - r-критерий ниже 0,1; ** - r-критерий ниже 0,05; *** - r-критерий ниже 0,01; нр - несущественные различия (r-критерий выше 0,1).

Таблица П. 13. Корреляционное отношение изучаемых параметров клубней к выделенным компонентам в 2019 году. Жирным шрифтом выделены самые высокие коэффициенты корреляции в отношении компонента-показатель.

Изучаемый показатель	Компонента - % описанной модели и корреляция			
	1 - 44,22%	2 - 27,87%	3 - 16,22%	4 - 8,13%
АО активность, %	-0,947877	-0,141018	0,093268	-0,170980
Витамин С, мг/100 г	-0,561315	0,132263	0,798460	0,049170
Крахмал, % сухого вещества	-0,595626	-0,738501	-0,242418	0,085054
РК, % сухого вещества	-0,235328	-0,803081	-0,435496	-0,312987
P ₂ O ₅ , % сухого вещества	-0,900911	0,408735	-0,043781	0,015769
K ₂ O, % сухого вещества	-0,896555	0,273892	0,259091	0,002365
N общий, % сухого вещества	-0,280881	0,607022	-0,177864	-0,711519
N белковый, % сухого вещества	0,151702	-0,805827	0,449202	-0,289351
NO ₃ ⁻ , мг/100г	-0,650134	0,279269	-0,622536	0,222581
Товарный картофель, т/га	-0,832602	-0,470945	0,048366	0,190401

Таблица П. 14. Корреляционное отношение изучаемых параметров клубней к выделенным компонентам за 2021 год. Выделены самые высокие коэффициенты корреляции в отношении компонента-показатель.

Изучаемый показатель	Компонента - % описанной модели и корреляция			
	1 - 40,20 %	2 - 20,94%	3 - 14,56%	4 - 8,71%
АО активность, %	-0,416138	-0,344917	-0,224728	0,688136
Витамин С, мг/100 г	0,893631	0,168968	-0,157927	-0,109465
Крахмал, % сухого вещества	0,112042	-0,839152	0,464004	-0,192437
РК, % сухого вещества	-0,014696	-0,961757	0,187562	-0,027290
P ₂ O ₅ , % сухого вещества	0,877901	0,195718	0,158296	0,214308
K ₂ O, % сухого вещества	0,811735	0,071680	0,492395	-0,015468
N общий, % сухого вещества	0,294628	0,165826	0,594188	0,471783
N белковый, % сухого вещества	0,948003	-0,134991	-0,199455	-0,050839
NO ₃ ⁻ , мг/100г	-0,539994	0,399919	0,569729	0,034512
Товарный картофель, т/га	-0,603338	-0,260728	-0,381061	0,274687

Таблица П. 15. Корреляционное отношение изучаемых параметров клубней к выделенным компонентам в 2022 году. Выделены самые высокие коэффициенты корреляции в отношении компонента-показатель.

Изучаемый показатель	Компонента - % описанной модели и корреляция			
	1 - 49,71%	2 - 29,24%	3 - 9,45%	4 - 5,98%
АО активность, %	-0,884092	-0,400629	0,112792	0,013334
Витамин С, мг/100 г	-0,732282	-0,346584	-0,467404	0,037018
Крахмал, % сухого вещества	-0,383395	0,846770	0,339576	-0,064736
РК, % сухого вещества	-0,337221	0,895786	0,154215	-0,051962
P ₂ O ₅ , % сухого вещества	0,850646	0,273717	0,127621	-0,326178
K ₂ O, % сухого вещества	-0,591754	-0,430346	0,058538	-0,668509
N общий, % сухого вещества	-0,836281	0,454390	-0,000607	0,084987
N белковый, % сухого вещества	-0,927669	0,257152	0,061660	0,039116
NO ₃ ⁻ , мг/100 г	0,827191	0,405685	-0,323693	-0,069514
Товарный картофель, т/га	-0,284507	0,653021	-0,668426	-0,152139