

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПОСЕВНОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ВСХОЖЕСТЬ КЛУБНЕЙ И РОСТ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ СОРТА МЕТЕОР

© 2023 г. А. С. Аллаярова^а, *, А. В. Шитикова^а, С. Р. Аллаяров^б,
С. В. Демидов^б, У. Ю. Аллаярова^б

^аРоссийский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 127434 Россия

^бИнститут проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка Московская обл., 142432 Россия

*E-mail: sadush@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 26.05.2022 г.

После доработки 08.11.2022 г.

Принята к публикации 10.11.2022 г.

Формирование урожая картофеля на дерново-подзолистых почвах Полевой опытной станции РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева показало, что наиболее благоприятным для стимулирования роста и развития растений картофеля сорта Метеор являются дозы облучения посевных клубней 200–300 Гр. После такой радиационной обработки семенного материала в растущем картофеле наблюдается наибольший прирост в длине глазков, в количестве глазков и стеблей, в показателе количества фотосинтетической активной биомассы, в содержании сухих веществ в листьях и стеблях, а также в количестве крахмала в клубнях выращенного картофеля. Все это может быть использовано для повышения урожайности картофеля и его потребительских качеств.

Ключевые слова: клубни картофеля, гамма-облучение, всхожесть, рост и развитие растений, урожайность

DOI: 10.31857/S0023119323020031, EDN: NGMCVU

ВВЕДЕНИЕ

Согласно обширным литературным данным [1–3], для облучения растений ионизирующим излучением на разных этапах их развития используются семена, проростки, взрослые растения и плоды. Для радиационной обработки картофеля чаще всего используются его клубни [4–6], проростки *in vitro* [4, 7, 8], и очень редко семена картофеля [9]. Одним из перспективных направлений использования ионизирующего излучения для облучения растений является применение сравнительно небольших доз радиации в облученных семенах и растениях для увеличения всхожести и ускорения прорастания, повышения урожайности и содержания в плодах питательных веществ [8, 10]. Априори, эффективность данного способа радиационной обработки картофеля зависит не только от условия облучения, но и от сорта картофеля и условий дальнейшего выращивания растений.

Цель настоящего исследования – изучение влияния дозы предпосевного γ -облучения клубней картофеля на всхожесть клубней, рост и развитие растений, урожайность и качество клубней

картофеля сорта Метеор в условиях Московской области Российской Федерации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Объектом исследования был ультраранний сорт картофеля ранней группы спелости российской селекции Метеор, содержащий 10–12% крахмала. Для посадки были отобраны клубни без глазков весом 70–80 г. Их посадка проводилась в мае, после достижения почвы физической спелости. Высаживали картофель в гребни, нарезанные тракторным орудием на глубину 8–10 см.

Гамма-облучение

Предпосевное облучение клубней картофеля проводилось γ -лучами Co^{60} на УНУ “Гамма-100” ИПХФ РАН при мощности дозы облучения 3.6 Гр/с.

Полевой опыт

Формирование урожая и изучение качества клубней картофеля проводилось в 2019 г. в усло-

виях полевого опыта на дерново-подзолистых почвах на территории РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева в 2019 г. Данная станция располагается в условиях, стандартных для Центрального региона России в условиях Нечерноземной зоны, для которой характерен умеренно-континентальный климат и обычно преобладают западные и юго-западные ветра. По механическому составу почвы станции суглинистые супесчаные, ее верхние слои выщелоченные. В верхних горизонтах (40–50 см) наблюдается песчаный крупный и пылеватый суглинок. В пахотном слое опытной станции по данным агрохимических анализов в 100 г почвы имеется 2.4–2.5 г перегноя, 16–17 мг P_2O_5 , 8–11 мг K_2O . Потребности в известковании у почвы практически не наблюдается, поскольку рН водной вытяжки составляет 5.8–6.2 [11].

Полевой опыт был трехфакторным, варианты размещены рандомизированным методом, повторность четырехкратная, расположение повторений – сплошное, а площадь одной делянки 25 м².

Основное правило проведения полевого опыта – выполнение каждой из работ на всех вариантах опыта в течение одного дня. Фенологические наблюдения проводили во время вегетации картофеля, отмечали начало всходов картофеля и полные всходы, начало и полную бутонизацию картофеля, начало и полное цветение картофеля, начало и полное увядание ботвы картофеля. Следует отметить, что начало у каждой фазы развития обозначается тогда, когда 25% растений достигает в своем развитии этой фазы, тогда как полная фаза отмечается, когда 75% растений картофеля достигли данной фазы развития. Густоту и высоту стеблестоя картофеля определяли во время всех фаз развития на специально выбранных растениях подсчетом количества на каждом из этих растений и измерением их высоты.

В условиях полевого опыта проводилось определение индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный индекс растительности – количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы) с помощью сенсорного датчика GreenSeeker RT 200 [12]. В дальнейшем зависимость между количеством хлорофилла и обеспеченностью азотом у каждого растения позволила аппарату Green Seeker по степени окраски листьев определять потребность картофеля в азоте. Особенно это важно в период клубнеобразования картофеля. Индекс NDVI широко используется для количественной оценки растительного покрова и прямо зависит от количества активной фитомассы растений. На его показания влияют многие факторы, такие как вид растений; интенсивность роста, тип куста; состояние посадок; их экспозиция и под каким углом они наклонены к почве; цвет почвы под растениями. Значения NDVI варьирующиеся в интервале

от –1 до 1 для зеленой растительности обычно составляют от 0.1 до 0.8 [13].

Расчет вегетационного индекса проводится по алгоритму, который есть в программах ScanView, ENVI, Scanex MODIS и т.д., используемых при обработке данных дистанционного зондирования. Данный индекс отображает плотность растительности, что позволяет провести оценку всхожести и роста растений, определить их продуктивность и узнать о проблемных местах угнетенных растений. Это делает возможным принятие верного и долгосрочного решения, направленного на увеличение урожайности. Для удобства восприятия участки с разным растительным состоянием изображаются отличными друг от друга цветами. В экспериментах для сканирования посева были использованы датчики GreenSeeker RT 200.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прирост в количестве и длине глазков в ходе хранения при комнатной температуре облученных клубней картофеля

Предпосевную радиационную обработку клубней картофеля проводили за 7 дней до посадки, поскольку предварительные эксперименты показали, что этот период является наилучшим сроком их облучения. Облучение клубней в ранние сроки вызывали ухудшение посадочных качеств, вследствие быстрого их прорастания и обламывания ростков при посадке. После семидневного хранения при комнатной температуре и естественной освещенности были определены количество и длина глазков, появившихся в ходе проращивания как облученных, так и не облученных клубней картофеля. На рис. 1 приведена зависимость от дозы γ -облучения прироста в длине и количестве глазков, выросших в процессе семидневного проращивания картофеля. Приведенные на рис. 1 зависимости имеют экстремальный характер с точкой перегиба в верхней части графиков. Из графика 1а видно, что увеличение дозы радиационной обработки клубней от 100 до 300 Гр приводит к увеличению средней длины глазков от 6.5 до 9.7 см. Последующее увеличение дозы облучения до 600 Гр вызывает уменьшение средней длины глазков до 6.4 см. Среднее количество глазков на клубне картофеля также сначала растет с дозой облучения и достигает 3.4 глазков при 300 Гр, а затем начинает падать с повышением дозы облучения и доходит до 2.0 глазков на клубнях, облученных дозой 600 Гр (рис. 1б).

Получается, что облучение клубней дозами 200 и 300 Гр вызывает наибольшее ускорение появления глазков, их длину и количество в ходе хранения облученных клубней при комнатных условиях. Надо полагать, что определенная степень повреждения и дезорганизация ферментных

механизмов, индуцированная такими дозами радиации оказывается благотворной, и приводит к более полному и раннему прорастанию клубней картофеля.

Известно [14, 15], что излучения высокой энергии в любой дозе прямо или косвенно вызывает в биополимерах появление свободных радикалов, ионов, возбужденных атомов и т.п. Такие продукты радиолиза совместно с кислородом воздуха и влаги инициируют цепной механизм лучевого поражения облученных макромолекул, приводящего к усилению обмена веществ и активизирующего ряд ферментов. По совокупности все это усиливает процессы окисления и запускает процесс быстрой мобилизации запасов питательных веществ. Видимо, по этой причине процессы “пробуждения”, выводящие из состояния покоя клубни, облученные дозой 200–300 Гр идут значительно быстрее. При аналогичных условиях хранения в течение семи дней в клубнях, не подвергнутых γ -облучению, появляется всего лишь один глазок, а его средний прирост составляет 2.8 см.

Таким образом, предпосевная радиационная обработка γ -излучением дозой от 100 до 300 Гр клубней картофеля сорта Метеор способствует почти трехкратному повышению его лабораторной всхожести. Это свидетельствует о большой эффективности использования предпосевной радиационной обработки клубней данного сорта картофеля для стимуляции их роста и всхожести. Следовательно, такие дозы предпосевного облучения клубней картофеля способствуют раннему прорастанию клубней и могут быть использованы для повышения его урожайности. С другой стороны, результаты экспериментов показывают, что для остановки прорастания данного сорта картофеля с целью продления срока его хранения, дозы радиационной обработки должны быть больше 600 Гр, поскольку при меньших дозах прирост в длине и количестве глазков в клубнях, облученных γ -лучами всегда больше, чем в необлученных клубнях.

Высота и количество стеблей в различных периодах роста картофеля, выращенного из облученных клубней на опытном поле

В развитии растений картофеля имеются несколько значимых периодов, а именно: прорастание клубней, всходы, бутонизация растений, цветение и увядание. Их продолжительность зависит от многих факторов, в том числе от доз радиационного облучения, как куста растущего растения, так и клубня семенного картофеля. Наряду с этим радиационная резистентность растения зависит от его вида, а внутри одного вида от его сорта. Результаты исследования, проведенного в настоящей работе, показали, что в растениях картофеля сорта Метеор, выращенных на опытном поле из

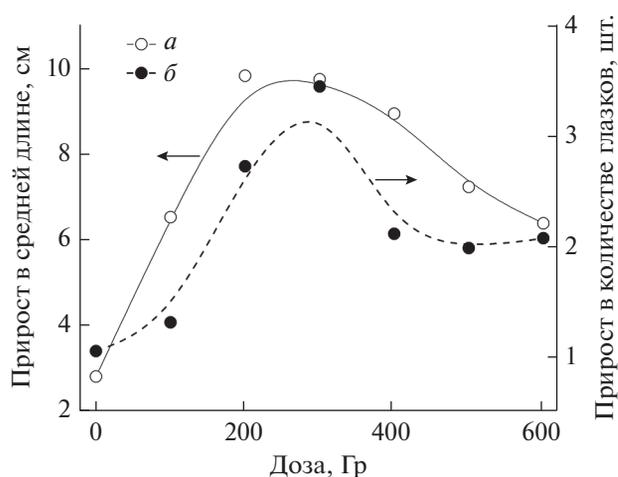


Рис. 1. Зависимость от дозы γ -облучения прироста в длине (а) и количестве (б) глазков картофеля после хранения облученных клубней при комнатной температуре в течение семи суток.

семенного картофеля и его γ -облученных аналогов продолжительность периодов посадки — всходы, всходы — бутонизация, бутонизация — цветение и цветение — увядание практически не зависят от дозы предпосевного облучения клубней семенного картофеля, и находятся в интервале 10 ± 1 , 14 ± 1 , 18 ± 1 и 25 ± 1.5 дней соответственно. Таким образом, показано, что дозы предпосевного облучения клубней от 100 до 600 Гр практически не сказываются на сроках межфазных периодов развития растений картофеля.

Рост растений картофеля является необратимым процессом и зависит от совокупности всех факторов, влияющих на их жизнь. Для определения влияния дозы предпосевного облучения клубней на интенсивность роста и развития растений картофеля, а также на течение физиолого-биохимических процессов в полевых и вегетационных опытах были проведены фенологические наблюдения и биометрические учеты высоты растений и количества стеблей. Полученные данные по высоте (кривые а–г) и количеству стеблей (кривые д–з), появившихся в период вышеуказанных четырех фаз развития растений картофеля, выращенных из облученных от 100 до 600 Гр клубней приведены на рис. 2.

Растения, выросшие из облученных клубней, раньше и выше вытянулись в длину, заметно ускорилось прохождение межфазных периодов роста и развития. Предпосевное облучение дозой 100 Гр клубней картофеля привело к наибольшему приросту (19 см) в высоте стеблей после всходов до бутонизации растений (рис. 2 а, б). Между тем, в период между цветением и увяданием прирост в высоте стеблей составил не более 7 см, а в межфазном периоде бутонизация—цветение рост

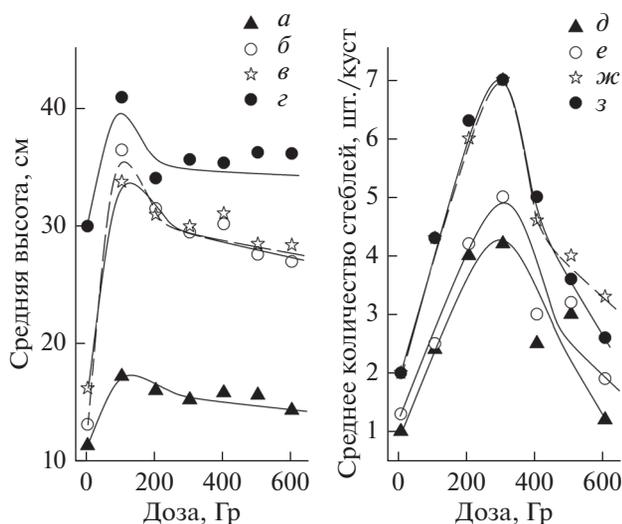


Рис. 2. Зависимость высоты (*а–г*) и количества стеблей (*д–з*) во время всходов (*а, д*), бутонизации (*б, е*), цветения (*в, ж*) и увядания (*г, з*) растений картофеля от дозы предпосевного γ -облучения клубней картофеля.

стеблей вовсе не происходил. Как видно из рис. 2, облучение клубней перед посадкой дозой 200–600 Гр приводит к незначительному сокращению темпа прироста от дозы облучения высоты стеблей во всех периодах развития растений, чем в облученных дозой 100 Гр клубнях семенного картофеля.

В отличие от развития картофеля из облученных семенных клубней, в картофеле, выращенном из необлученных клубней, наибольший прирост на 14 см в росте стеблей наблюдается в период от цветения до увядания ботвы растения, а также в них во всех пяти этапах развития растений картофеля, прирост в высоте стеблей всегда ниже, чем в растениях, выращенных из облученных клубней.

Таким образом, более ранние и дружные всходы облученных клубней, после посадки дали хорошее начало быстрому росту стеблей в высоту в межфазный период от всходов до бутонизации растений картофеля. К тому же, наибольший прирост в высоту стеблей растений картофеля наблюдается при использовании для посадки клубней, облученных дозой 100 Гр. При этом увеличение дозы предпосевного облучения клубней от 100 до 300 Гр сопровождается незначительным сокращением величины такого прироста, а дальнейшее повышение дозы от 300 до 600 Гр практически не сказывается на величине прироста. В отличие от случая использования облученных клубней для посадки, в вариантах без облучения, наибольший прирост в высоту стеблей выросшего картофеля наблюдается в межфазный период от цветения растений до увядания ботвы.

Разумеется, наряду с высотой растений картофеля, количество стеблей отображает размер фотосинтетической поверхности, которая напрямую коррелирует с урожайностью.

Независимо от дозы предпосевного облучения клубней, во всех фазах развития растений картофеля наибольшим количеством стеблей обладали растения, выращенные из клубней, облученных дозой 200–300 Гр. Их количество в периоды цветения и увядания достигает до 6–7 штук в одном кусте картофеля. В то же время, при аналогичных условиях выращивания, в одном кусте растений, выращенном из необлученных клубней, имеются не более 2 стеблей.

Определение содержания листьев и стеблей в фазу цветения растений

Ботва картофельного растения является жизненно важным органом, которая в виде листьев производит питательные вещества, а также в роли стеблей не только поддерживает листья и цветы, но и по ним к листьям и цветам поднимается вода с растворенными в ней минеральными веществами, циркулируют жизненные соки растения. К тому же в стебле могут запасаться питательные вещества.

В целях определения влияния дозы предпосевного облучения клубней на изменения количества надземной массы картофеля было проведено измерение массы стеблей и листьев в фазе цветения растения, выращенного из клубней с различной дозой предпосадочной радиационной обработки.

На рис. 3 приведены изменения от дозы предпосевного облучения клубней, относительного содержания листьев (кривая *б*) и стеблей (кривая *в*) в общей зеленой массе растений (кривая *а*) в период цветения картофеля. Как видно, масса стеблей и листьев растения, выращенного из клубней, облученных дозой 100 Гр, составляет 273 г, что на 30% меньше массы ботвы растения, выращенного при тех же условиях из необлученных клубней картофеля (рис. 3, *а*). В то же время, увеличение дозы предпосевного облучения клубней до 300–500 Гр положительно влияет на рост массы выращенного растения, и она практически достигает массы растения, выращенного из необлученных клубней. К тому же, после предпосадочного облучения дозой 600 Гр зеленая масса выросшего из облученных клубней растения (413 г) больше массы растений из необлученных клубней (390 г). Следовательно, наибольшей зеленой массой характеризуются растения картофеля, выросшие из клубней, облученных дозой 600 Гр.

Содержание листьев в общей зеленой массе растения картофеля растет с дозой предпосевного облучения клубней картофеля до 200 Гр и дости-

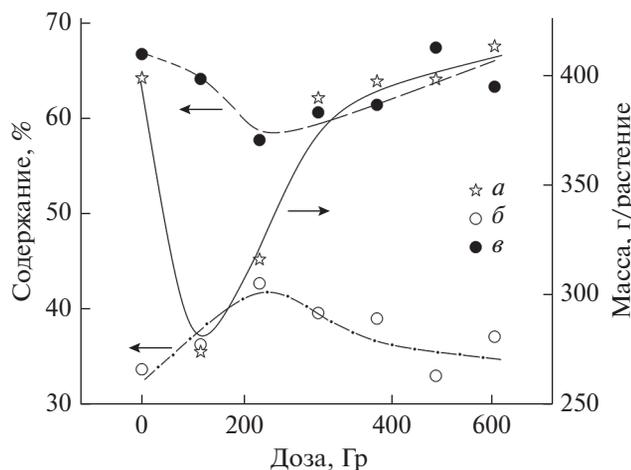


Рис. 3. Изменение в зависимости от дозы предпосевного облучения клубней картофеля массы растения картофеля (а), выращенного из облученных клубней, относительного содержания листьев (б) и стеблей (в) в фазу цветения растений.

гает 42.5% (рис. 3, б). Дальнейшее увеличение предпосевной дозы облучения клубней приводит к постепенному сокращению доли листьев в результате роста содержания стеблей в зеленой массе растений картофеля. При аналогичных условиях роста растения, содержание листьев и стеблей в общей зеленой массе картофеля, выращенного из необлученных клубней, составляет 33.5 и 66.5% соответственно. Как видно предпосевное облучение клубней дозой около 200 Гр приводит к увеличению относительного содержания листьев картофеля, что, в свою очередь приводит к увеличению фотосинтетической поверхности, которая способствует активному росту и развитию картофеля.

Измерения содержания хлорофилла в листьях картофеля

Основная роль листьев растений картофеля заключается в обеспечении хлорофиллом и активации процессов фотосинтеза. Поэтому, чем больше площадь поверхности листьев, тем больше они подвергаются воздействию агентов фотосинтеза. Содержание хлорофилла в листьях картофеля может изменяться по мере роста и развития. В ранних этапах оно низкое, а с ростом растения может достигнуть максимума в фазе полного листового развития. Далее наблюдается постепенное уменьшение количества хлорофилла. В настоящей работе содержание хлорофилла в листьях растений картофеля определялось через 10 дней после всходов, во время бутонизации, цветения и через 15 дней после цветения.

Результаты исследования приведены на рис. 4. Видно, что доза предпосевного облучения клубней,

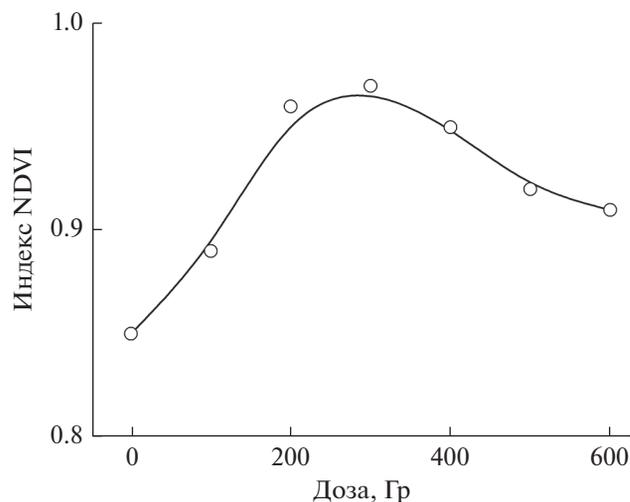


Рис. 4. Зависимость от дозы облучения нормализованного разностного индекса растительности (NDVI, показатель количества фотосинтетически активной биомассы) в картофеле, облученном перед посадкой.

на которую приходится максимум содержания хлорофилла в листьях растений картофеля, выращенных из облученных клубней, составляет 300 Гр. Поэтому, при этой дозе облучения зависимость показателя количества фотосинтетически активной биомассы (NDVI) принимает наибольшее значение (0.97), вместе с тем и слева, и справа от этой дозы облучения индекс NDVI снижается и достигает до 0.89 и 0.91 при облучении семенных клубней дозами, соответственно, 100 и 600 Гр.

Таким образом, рост дозы предпосевного облучения клубней от 100 Гр сопровождается ростом содержания хлорофилла в листьях картофеля, и оно достигает максимума при дозе 300 Гр. Однако, дальнейшее повышение дозы облучения клубней до 600 Гр вызывает снижение содержания хлорофилла в листьях растений картофеля из облученных клубней.

Определение содержания крахмала и сухого вещества в фазе цветения

Дозы предпосевного облучения клубней заметно влияют на химический состав клубней и ботвы выросшего картофеля. На рис. 5, а представлено изменение содержания крахмала в клубнях картофеля от дозы облучения семенных клубней. Видно, что при дозах облучения семенного материала дозой 200 Гр наблюдается наибольшее повышение содержания крахмала до 15.2% в составе выращенного картофеля, в то же время в картофеле, выращенном из необлученных клубней содержится 10.6% крахмала. Повышенные содержания крахмала до 14.4% наблюдается и в картофеле, выращенном из клубней, облученных 300 Гр. При остальных дозах облучения семенных клубней за-

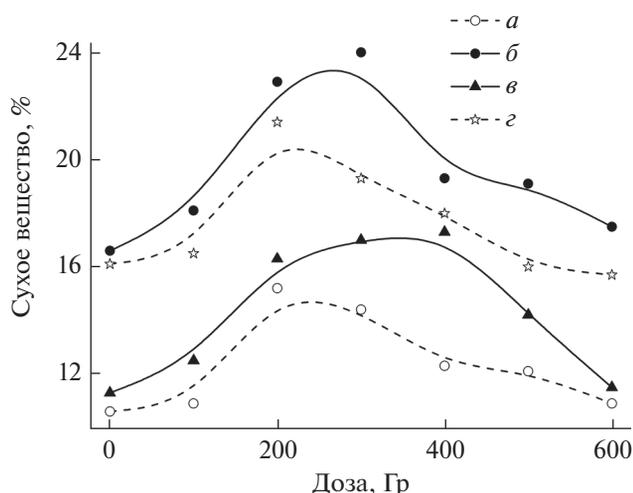


Рис. 5. Изменение в зависимости от дозы предпосевного облучения клубней картофеля содержания крахмала (а) и сухого вещества в листьях (б), стеблях (в) и клубнях (г) в фазе цветения картофеля.

метного повышения содержания крахмала не наблюдалось. Таким образом, повышенное содержание крахмала в клубнях выросшего картофеля наблюдается в случае использования для посадки клубней, облученных дозами 200–300 Гр. После таких доз радиационной обработки посевных клубней повышается не только содержание крахмала, но и всех сухих веществ, остающихся после высушивания клубней выращенного картофеля до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105°C (рис. 5, г).

Также было установлено, что изменение содержания сухого вещества в ботве растений в фазе цветения картофеля, зависит от дозы предпосевного облучения клубней картофеля. Из зависимости от дозы облучения семенных клубней содержания сухого вещества в листьях (кривая б) и стеблях (кривая в) на рис. 5 видно, что наибольшее количество сухого вещества накапливается также в растениях картофеля, выросших из его клубней, предварительно облученных дозами 200 и 300 Гр.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- эффективность воздействия γ -лучей на клубни картофеля зависит от дозы облучения. Было установлено, что облучение клубней дозами 200 и 300 Гр вызывает наибольшее ускорение прорастания, появления ростков, а также увеличение длины и количества ростков (200 Гр: 9.8 см и 2.7 шт.; 300 Гр: 9.7 см и 3.4 шт.);

- продолжительность межфазных периодов — это важный показатель для оценки роста и развития картофеля. Из проведенных наблюдений было установлено, что вне зависимости от дозы облучения у всех растений всходы появились в течение 10 ± 1 дней после посадки;

- по проведенным измерениям высоты растений и количества стеблей наиболее высокими оказались растения, клубни которых были облучены дозой 100 Гр (высота 41 см). Наиболее высокую остепенность показали растения, клубни которых были облучены дозой 200 и 300 Гр (6.3 и 7.0 шт. соответственно);

- в результате биометрических учетов в фазе цветения картофеля и лабораторных определений массы ботвы и листьев, учета клубней и сухого вещества в образцах картофеля были сделаны выводы о том, что наибольшей вегетативной массой обладают клубни, облученные дозой 600 Гр (413 г/растение). После измерения количества фотосинтетически активной биомассы на основе показаний прибора Green Seeker было установлено, что увеличение содержания хлорофилла в листьях картофеля наблюдается уже при предпосевном облучении клубней дозой 100 Гр, а при дозе 200 и 300 Гр содержание этого пигмента в листьях растений картофеля достигает максимального значения (0.97) и превышает контроль (0.85). Однако дальнейшее повышение дозы предпосевного облучения клубней до 600–700 Гр вызывает снижение в листьях содержания хлорофилла;

- в результате биометрических учетов в фазе цветения картофеля и лабораторных определений массы ботвы и листьев, учета клубней и сухого вещества в образцах картофеля были сделаны выводы о том, что наибольшей вегетативной массой обладают клубни, облученные дозой 600 Гр (413 г/растение);

- результаты исследований показывают, что наибольшее содержание сухого вещества в клубнях картофеля наблюдается при облучении клубней перед посадкой дозой 200 и 300 Гр (21.4 и 19.3% сухих веществ). Также было установлено, что изменение содержания крахмала в клубнях картофеля зависит от дозы предпосевного облучения клубней. Наибольшее количество крахмала накапливается в клубнях картофеля, облученных дозой 200 и 300 Гр (15.2 и 14.4% соответственно).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Государственного задания АААА-А19-119041090087-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohamed E.A., Osama E., Manal E., Samah A., Salah G., Hazem K.M., Jacek W., Nabil E. // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2021. V. 8. P. 1.

2. Авдюхина В.М., Близняк У.А., Борщegovская П.Ю., Бусленко А.В., Илюшин А.С., Кондратьева Е.Г., Крусанов Г.А., Левин И.С., Симицын А.П., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. С. 99.
3. Issa F.H., Alhasnawi A.N., Sabah S.S. // Plant Archives. 2018. V. 18. P. 2317.
4. Das A., Gosal S.S., Sidhu J.S., Dhaliwal H.S. // Euphytica. 2000. V. 114. P. 205.
5. Frazier M.J., Kleinkopf G.E., Brey R.R., Olsen N.L. // American Journal of Potato Research. 2006. V. 83. P. 31.
6. Nayak C.A., Suguna K., Narasimhamurthy K., Rastogi N.K. // Journal of Food Engineering. 2007. V. 79. P. 765.
7. Al-Safadi B., Ayyoubi Z., Jawdat D. // Plant Cell. Tissue and Organ Culture. 2000. V. 61. P. 183.
8. Shin J.M., Kim B.K., Seo S.G., Jeon S.B., Kim J.S., Jun B.K., Kang S.Y., Lee J.S., Chung M.N., Kim S.H. // African J. Agric. Res. 2011. V. 6. P. 1447.
9. Kukimura H. // Potato Research. 1972. V. 15. P. 106.
10. Grover S., Sardar A. // International Journal of Scientific & Technology Research. 2014. V. 3. P. 32.
11. Shitikova A.V., Abiala A.A. // Annals of Agri Bio Research. 2019. V. 24. P. 196.
12. Власюк П.А. Биологические элементы в агрономии. Колос: Москва, 1969. 516 с.
13. <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>
14. Sharpatyi V.A. Radiation Chemistry of Biopolymers. Ed. by E.G. Zaikov. London: CRC Press, 2006.
15. Naeem M., Aftab Tariq Khan M., Masroor A. Radiation-processed Polysaccharides: Emerging Roles in Agriculture. Academic Press Inc.: USA, 2021.