

УДК 631.527: 544.54

UDC 631.527: 544.54

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (биологические науки, сельскохозяйственные науки)

4.1.2. Plant breeding, seed production and biotechnology (biological sciences, agricultural sciences)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В СЕЛЕКЦИИ РАСТЕНИЙ

THE USE OF IONIZING RADIATION IN PLANT BREEDING

Баюров Леонид Иванович

к. с.-х. н., доцент

SPIN-код: 3777-5470, AuthorID: 270952

Тел.: 8(918)413-51-86

E-mail: leo56@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия

Bayurov Leonid Ivanovich

Cand.Agr.Sci., associate Professor

RSCI SPIN-code: 3777-5470, AuthorID: 270952

Tel.: +7(918)413-51-86

E-mail: leo56@mail.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin", Krasnodar, Russia

В связи с прогнозируемым ростом населения во всем мире совершенствование селекционных стратегий в сельском хозяйстве считается обязательным. В настоящее время оно сталкивается со многими проблемами, связанными с глобальным изменением климата и разрывом между спросом на продовольствие и наличием сельскохозяйственных земель. В результате в настоящее время растет понимание того, что обычного ведения бизнеса в сельском хозяйстве будет недостаточно для решения этих проблем. Это подчеркивает необходимость разработки новых технологий, таких как радиационная стимуляция роста, направленных на повышение устойчивости растений к неблагоприятным условиям и урожайности, а также осуществление радиомутагенеза с целью получения новых сортов и разновидностей растений. Существует мнение, что небольшие дозы гамма-излучения способны активировать клеточное деление, а также способствовать росту и развитию растений. Несмотря на то что убедительные объяснения этого стимулирующего и морфогенетического воздействия гамма-излучения пока не были найдены, некоторые исследования поддерживают предположение о том, что в этом процессе важную роль играют изменения в активности ферментов, баланс фитогормонов и повышение антиоксидантной способности клеток. Ряд исследований показали улучшение не только удлинения корней и побегов, но и роста биомассы и собранного урожая у растений, подверженных различным видам стресса. С практической точки зрения, стимулирующее воздействие ионизирующей радиации на хозяйственно полезные признаки растений обладают потенциалом для повышения урожайности культур и качества урожая, что является важной предпосылкой для внедрения новых методов ведения селекции в растениеводстве

Due to the projected population growth worldwide, the improvement of breeding strategies in agriculture is considered mandatory. It is currently facing many challenges related to global climate change and the gap between food demand and the availability of agricultural land. As a result, there is now a growing understanding that doing business in agriculture will not be enough to solve these problems. This highlights the need to develop new technologies, such as radiation stimulation of growth, aimed at increasing plant resistance to adverse conditions and yields, as well as the implementation of radiomutagenesis in order to obtain new varieties and varieties of plants. It is believed that small doses of gamma radiation can activate cell division, as well as promote the growth and development of plants. Although convincing explanations for this stimulating and morphogenetic effect of gamma radiation have not yet been found, some studies support the assumption that changes in enzyme activity, phytohormone balance and increased antioxidant capacity of cells play an important role in this process. A number of studies have shown an improvement not only in the elongation of roots and shoots, but also in the growth of biomass and harvested crops in plants exposed to various types of stress. From a practical point of view, the stimulating effect of ionizing radiation on economically useful plant traits has the potential to increase crop yields and crop quality, which is an important prerequisite for the introduction of new breeding methods in crop production.

Ключевые слова: СЕЛЕКЦИЯ, ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, МУТАЦИИ, ПОЛЕЗНЫЕ КАЧЕСТВА, УРОЖАЙНОСТЬ

Keywords: BREEDING, IONIZING RADIATION, MUTATIONS, BENEFICIAL QUALITIES, YIELD

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-205-002>

<http://ej.kubagro.ru/2025/01/pdf/02.pdf>

Введение. Ожидается, что к 2050 году население Земли достигнет 10 миллиардов человек. Урожайность многих сельскохозяйственных культур уже не может обеспечить растущие требования к их производству. Поэтому повышение урожайности растений становится крайне важным, особенно в условиях растущего населения. В этой связи селекционеры начали разрабатывать новые сорта растений.

На протяжении многих лет с помощью радиомутагенеза были улучшены различные продовольственные, технические, кормовые и декоративные культуры для удовлетворения потребностей людей. В последние годы разработка новых методов стала еще более актуальной в селекционных стратегиях, направленных на создание новых сортов сельскохозяйственных культур.

Селекционные методы и впечатляющие биотехнологические результаты продолжают играть важную роль в создании высокопродуктивного и экологически чистого сельского хозяйства. Ключевым условием при этом является разработка и внедрение эффективных стратегий селекции, направленных на увеличение урожайности.

Вариабельность является основополагающим принципом селекции и представляет собой естественное явление. Мутация, вызванная γ -излучением, является единственным действенным способом, способным вызывать изменения в ДНК как прямым, так и косвенным образом.

С помощью технологии мутагенеза с применением ионизирующих излучений (ИИ) было выведено множество сортов сельскохозяйственных культур, что позволило улучшить их характеристики и повысить устойчивость к абиотическим и биотическим стрессам.

Селекция растений, как правило, начинается с индукции мутаций с помощью γ -облучения и включает в себя применение современных технологий, таких как культура тканей и молекулярная генетика. Тканевые культуры используются для создания новых сортов растений, в то время

как молекулярно-генетические подходы служат для изучения генетических характеристик этих сортов.

Облучение в сочетании с современными методами тканевой культуры и молекулярной генетики активно применяется для индукции мутаций в процессе селекции с целью разработки новых сортов, востребованных на рынке.

Селекция, основанная на радиационных мутациях, подразделяется на три категории: 1) классическая селекция, использующая радиационные мутации под воздействием мягко ионизирующих гамма- и рентгеновских лучей; 2) селекция, основанная на мутациях, вызванных корпускулярными излучениями; 3) селекция, осуществляемая с помощью мутаций, возникающих под влиянием космического излучения.

Исследования показали, что классическая селекция с использованием радиационных мутаций, являющаяся распространенным методом, достаточно эффективна для модификации генома различных сельскохозяйственных растений через прямое или косвенное воздействие энергии ионизирующих излучений (ИИ) на ДНК. Этот метод позволяет вызывать изменения в желаемых хозяйственно полезных признаках, которые либо не могут проявиться естественным образом, либо были утрачены в процессе эволюции.

На селекционный процесс сельскохозяйственных растений влияют различные факторы, среди которых присутствуют экологические и агрономические аспекты. Растет значимость выбора адаптивных генотипов при селекции культур. Главная цель состоит в том, чтобы добиться более высокой продуктивности растений, а также улучшить такие параметры, как размер плодов и качество собранного урожая, объединив в фенотипе различные полезные признаки разных видов и сортов растений в одном организме. В ходе рекомбинации аллелей возникают потомки, обладающие определенными вариациями по нескольким характеристикам. Однако ре-

комбинация сама по себе не приводит к возникновению новых признаков [5].

Хотя генетические изменения и обеспечивают естественную вариативность, необходимую для эволюции видов, мутации играют важную роль не только в адаптации к окружающей среде. Они являются ключевыми факторами генетической изменчивости и в конечном итоге способствуют образованию новых видов.

Таким образом, мутации также применяются человеком в сельском хозяйстве для селекционной работы с основными культурами и повышения их урожайности. В качестве нового подхода использование альтернативных методов, таких как мутационная селекция и биотехнология, особенно эффективно для некоторых полностью стерильных растений [4].

Обсуждение. Селекция с использованием радиационных мутаций применяется уже почти 100 лет и позволяет успешно улучшать сельскохозяйственные культуры за счет увеличения генетического разнообразия. Однако в природе спонтанные мутации возникают крайне редко (примерно 10^{-6}), что делает процесс отбора лучших сортов достаточно сложным и длительным. За последние пятьдесят лет наблюдается значительный рост численности основных сельскохозяйственных культур.

Индукцированный мутагенез – это процесс, при котором изменения в геноме растений вызываются воздействием на них мутагенных агентов, таких как химические вещества или радиация. Это позволяет создавать большое количество разнообразных мутантов, среди которых могут быть те, у которых улучшены желаемые свойства.

Комбинированные методы селекции включают в себя сочетание различных подходов, таких как индуцированный мутагенез, генетическая инженерия, молекулярная селекция и традиционные методы отбора. Это позволяет ускорить процесс селекции и получить растения с желаемыми свойствами в более короткие сроки.

Такие методы позволяют улучшить урожайность, устойчивость к болезням и вредителям, качество плодов и другие важные характеристики сельскохозяйственных растений. Благодаря этому сельскохозяйственные производители могут быстрее и эффективнее создавать новые сорта и гибриды, которые будут отвечать современным требованиям рынка и потребителей.

Селекция растений требует генетической изменчивости полезных признаков для улучшения сельскохозяйственных культур. Однако зачастую желаемой изменчивости не хватает. Тогда можно использовать мутагенные факторы, такие как радиация и определенные химические вещества, чтобы вызвать мутации и создать генетические вариации, из которых можно выбрать желаемые мутации.

Индукция мутаций стала проверенным способом создания вариаций внутри сорта сельскохозяйственных культур. Она позволяет вызвать желаемые признаки, которые либо не встречаются в природе, либо были утрачены в ходе эволюции. Селекция улучшенных сортов растений основана на двух принципах: генетической изменчивости и отборе.

Генетическая изменчивость является источником фенотипического разнообразия и является основным драйвером эволюционной диверсификации. Еще в начале XX в. ионизирующее излучение начали использовать для получения мутаций. Они могут быть в виде частиц или электромагнитного излучения. Тогда в основном использовались рентгеновские лучи, а позднее предпочтение было отдано γ -лучам и нейтронам.

Ученые показали, что относительно медленный темп естественной мутации может быть увеличен на несколько порядков путем облучения растений. Действительно, мутационная индукция была важным инструментом для выращивания сельскохозяйственных культур с момента получения первого мутантного сорта табака «Chlorina» в 1930-х гг. с помощью рентгеновского облучения его цветочных почек.

Существует два главных вида электромагнитного излучения: рентгеновские и гамма-лучи (γ -кванты), которые широко используются в биологических системах. Эти виды ИИ могут привести к серьезным проблемам в организме поскольку ионизирующее излучение настолько высокоэнергетическое, что может приводить к разрывам химических связей и изменениям электронной структуры. А это, в свою очередь, может изменять заряд атома, с которым взаимодействуют ИИ.

На высоких уровнях это может даже повредить и разрушить ядро атома, напрямую воздействуя на ДНК организма, и могут развиваться различные мутации. Воздействие высоких уровней радиации на организмы включает:

- хромосомные aberrации, определяемые как визуально наблюдаемые изменения в структуре хромосом;
- повреждение ДНК, включая «инверсию» последовательности азотистых оснований, а также «удаление» участков этой последовательности;
- замедление роста, определяемое как снижение скорости роста организмов; последствия для репродуктивной функции, в том числе бесплодие, снижение скорости размножения, аномалии развития или снижение жизнеспособности потомства;
- снижение всхожести семян; смертность, включая как острую летальность, так и долгосрочное сокращение продолжительности жизни и прямое ожоговое повреждение открытых тканей.

Степень воздействия радиации на растение или любой другой организм определяется тем, какое количество радиации получает организм, а также продолжительностью воздействия. Данные, полученные в результате аварии на Чернобыльской АЭС, позволяют привести более точные цифры. В местах, где радиационные дозы были меньше или равны 5 рад/год, не наблюдалось никаких вредных последствий действия радиации.

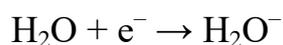
При дозах 5–400 рад/год радиационные эффекты были частично скрыты, то есть наблюдались неблагоприятные последствия для отдельных организмов, но не происходило существенных достоверных изменений в популяциях или экосистемах. При дозах более 400 рад/год наблюдались разрушительные последствия для всех популяций и сообществ, включая растительные.

Поэтому влияние радиации на рост и развитие растений может быть, как стимулирующим или промежуточным, так и вредным: все зависит от дозы излучения и длительности ее действия, которые воздействуют на растительные организмы в целом и отдельные ткани.

Необходимо проанализировать влияние ИИ как на генетическом, так и на системном уровнях. Модификации ДНК могут включать изменения азотистых (пуриновых и пиримидиновых) оснований, их замены и различные хромосомные аномалии (делеции и абберации).

Эти изменения приводят к макроскопическим трансформациям фенотипа, вызывая радиационные повреждения. Ионизирующее излучение играет важную роль в образовании радикалов в структуре вещества. Помимо ионизирующего излучения, к образованию радикалов могут приводить химические реакции и термические воздействия. Существует три различных способа образования радикалов: облучение (фотолиз и радиолиз), термолиз и окислительно-восстановительные реакции.

Поскольку все живые организмы состоят примерно на 70 % и более из воды, то значительная часть энергии ИИ (более 66 %), проходящих через клетки тканей, поглощается ее молекулами, образуя катионы и анионы:



Эти ионы отличаются от ионов воды, образующихся в естественных условиях в процессе электролитической диссоциации. Они характеризуют-

ся неустойчивой электронной структурой, так как имеют нечетное число электронов на внешней орбите и свободную валентность.

По этой причине они не могут долго существовать и быстро диссоциируют с образованием свободных радикалов. При этом катион молекулы воды образует протон и свободный радикал гидроксильной группы:



А при диссоциации отрицательного иона (аниона) образуется свободный радикал водорода (атомарный водород) и анион гидроксила:



Данные компоненты обладают высокой нестабильностью и радиотоксичностью. Поэтому они стремятся к достижению исходного стабильного статусного состояния, забирая электроны «в пару» у соседних молекул, что приводит к образованию новых свободных радикалов, первичных, а затем и вторичных радиотоксинов. Благодаря своим окислительно-восстановительным свойствам, они могут разрушать различные виды внутренних связей в биомолекулах, тем самым нарушая их химическую структуру и функции. [1].

Простые свободные радикалы (H^\bullet или OH^\bullet) имеют очень короткий период жизни (10^{-10} с), недостаточный для их перехода из цитоплазмы в ядро, где находится ДНК. Поэтому они взаимодействуют между собой, а H^\bullet , соединяясь с молекулой кислорода, превращается в более токсичный гидропероксильный радикал (HO_2^\bullet), который может действовать как окислитель в ходе биологически важных реакций, таких как выделение атомов водорода из токоферола и полиненасыщенных жирных кислот в липидных слоях клеточных мембран (рис. 1).

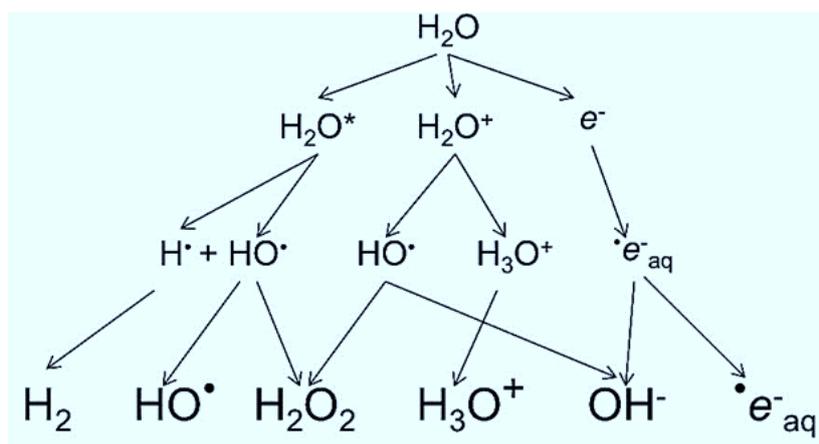


Рисунок 1 – Продукты радиолиза воды

Существует несколько способов применения ядерных технологий в сельском хозяйстве. При селекции растений облучение семян может вызывать генетическую изменчивость, которая позволяет селекционерам отбирать новые генотипы с улучшенными характеристиками, такими как скороспелость, устойчивость к засолению почв, урожайность и качество зерна.

ИИ также используются для лучевой стерилизации некоторых сельскохозяйственных продуктов, чтобы увеличить срок их хранения или уменьшить распространение патогенов при торговле этими продуктами в пределах одной или нескольких стран.

Для ранней оценки эффективности применения ионизирующей радиации с целью индуцирования мутаций обычно используется ряд радиобиологических параметров. Так, например, сообщалось о методах, основанных на физиологических изменениях, таких как подавление прорастания семян и удлинение побегов и корней у облученных зерновых и бобовых культур.

Использование голозерного ячменя в пищевой промышленности растет с каждым днем благодаря его пользе для здоровья. В результате исследования по селекции голозерного ячменя стали более популярными. В этих селекционных исследованиях для достижения более высоких результатов в отборе требуется широкий спектр желаемых признаков.

Одним из лучших методов получения генотипической изменчивости, которая имеет решающее значение для селекционных исследований голозерного ячменя, является мутация. Семена подвергались γ -облучению с использованием радиоизотопа Со-60, как источника гамма-излучения в различных дозах.

В то время как значения при низких дозах оказались сопоставимыми с контрольными показателями по большинству признаков, 250–300 Гр вызвали значительное влияние большинства признаков в первом поколении обоих генотипов. Дозы облучения 250–300 Гр отрицательно повлияли на высоту стебля, количество метелок и количество зерен в каждой из них у растений 2-го поколения, хотя отмечено положительное влияние на длину и массу зерен в колосе и массу 1000 зерен.

Было обнаружено, что мутантная популяция, полученная в результате γ -облучения семян различных генотипов голозерного ячменя, обладает достаточным разнообразием для отбора желаемых признаков. Кроме того, этот материал можно использовать для отбора растений с выдающимися характеристиками [2].

С помощью методов мутационной селекции был выведен высокоурожайный сорт ячменя с ранним сроком созревания, высоким содержанием белка и жесткой соломиной. Пакистанские исследователи во главе с Абдуллахом Хатри [3] получили три высокоурожайных и скороспелых мутанта индийской горчицы, обработав семена сорта S-9 (*Brassica juncea* L.) γ -лучами дозами 750–1000 кГр.

Гамма-лучи дозами 25–50 Гр оказывают значительное влияние на процентное содержание белка в зерне пшеницы, а увеличение дозы γ -облучения более чем на 50 Гр вызвало снижение содержания белка в зерне примерно на 30–70 %.

Как было указано выше, ионизирующие излучения могут взаимодействовать с биологическими тканями напрямую, посредством ионизации

молекул, или косвенно, за счет радиолиза молекул воды. Описание продуктов радиолиза различных биомолекул наглядно демонстрирует возможные взаимодействия и реакции между радикалами и субклеточными мишенями.

Исследования, проведенные в биологических средах, например, в клетках, как правило, показывают, что в случае с гидроксильными радикалами, образующимися при внешнем облучении, повреждение ДНК и липидов является вторичным процессом, а белки, скорее всего, являются первичными «мишенями» из-за их относительного большого количества и реакционной способности.

Активный кислород, образующийся вторично из перекиси водорода, способен вызывать изменения в дезоксирибозном кольце и азотистых основаниях. При этом пуриновые и пиримидиновые основания повреждаются продуктами радиолиза ДНК, вызванного свободными радикалами. Величина выхода отдельных продуктов важна и отличается от того, что образуется при окислительном метаболизме.

Несмотря на то что свободные радикалы влияют на ДНК и вызывают различные повреждения, считается, что они не приводят к фатальным исходам или мутациям. Повреждения оснований, вызванные действиями ИИ, активно исследуются в экспериментах *in vitro*.

В частности, установлено, что при прямом и непрямом воздействии радиации могут образовываться аналогичные химически активные соединения. Кислород является еще одним важным элементом, который является активным участником биологических эффектов ИИ. Он способен легко реагировать со многими свободными радикалами, что приводит к повреждению молекул ДНК.

Если местом повреждения является молекула дезоксирибоза ($C_5H_{10}O_4$), то непосредственно образуется «тормозная цепь». Повреждения оснований ДНК дестабилизируют N-гликозидные связи и образуются не-

основные остатки дезоксирибозы. Эти участки могут быть преобразованы в разрывы цепей.

Двухцепочечные разрывы возникают в результате локальной атаки двух или более свободных радикалов гидроксила на молекулу ДНК, что в процессе клеточного деления вызывает появление различных хромосомных аномалий. К их числу можно отнести неправильное расхождение и распределение хромосом, дефекты в разделении хроматид, образование «мостиков», обмен участками гомологичных хромосом (кроссинговер), их разрывы и утрата фрагментов хромосом.

Мутации – это спонтанно происходящие неожиданные изменения в генетическом коде, которые могут приводить к незначительным изменениям в фенотипе, которые невозможно выявить с помощью современных молекулярных методов.

В естественных условиях мутации способствуют тому, что растения развивают новые признаки, помогающие им адаптироваться к биотическим и абиотическим условиям окружающей среды. Со временем многие из этих признаков могут ослабевать или вовсе исчезать.

В широком диапазоне доз радиации частота мутаций, вызванных радиацией, пропорциональна дозе радиации. Таким образом, чем выше доза радиации, тем более выраженные морфологические изменения наблюдаются в образцах. Следовательно, низкий уровень радиации оказывает положительное влияние, например, увеличивает высоту растений кукурузы, в то время как высокий уровень радиации наносит вред растениям кукурузы и даже может привести к гибели растений.

Так, если при воздействии γ -излучения мощностью 10 кР было получено наибольшее количество проросших семян, а также самые высокие показатели высоты растений, то при действии дозы мощностью 50 кР высота растений кукурузы была минимальной.

В другом исследовании семена кукурузы предварительно замачивали в пяти концентрациях метронидазола, а затем подвергали воздействию четырех доз радиации. Одну часть семян использовали для цитогенетического анализа, а другую – посеяли для анализа выживаемости, чтобы получить затем семена F_2 . Цитогенетический анализ показал, что метронидазол повышает чувствительность к радиации в основном при дозах 30 и 60 Гр.

При дозе 90 Гр вредное воздействие радиации препятствовало анализу эффекта повышения чувствительности к радиации. Изменения, обнаруженные у поколения F_1 , вновь проявились у F_2 , что указывает на то, что эти аномалии не полностью обусловлены соматическим происхождением. Использование радиосенсибилизирующего соединения может быть полезным инструментом для получения мутантов у растений.

Воздействие низких доз γ -излучения на влажные семена показало увеличение как содержания, так и стабильности пигментов хлоропластов, хлорофиллов а, b и каротиноидов; более того, увеличивалось соотношение белок/хлорофилл, содержание дегидроаскорбиновой и, в большей степени, аскорбиновой кислот, а также фотохимической активности хлоропластов.

Определение гена, который претерпел естественные мутации, представляет собой сложную задачу. Когда селекционеры обнаруживают мутировавший ген, требуется вернуть характеристики дикого типа. Эта задача становится все более трудной из-за продолжительности процесса, необходимости привлечения большего числа специалистов и роста затрат.

Вот почему потребовалось усовершенствовать новые стратегии селекции, чтобы повысить урожайность культур. Для достижения этой цели селекционеры должны восстановить в культурных растениях ряд специфических признаков, которые играют важную роль в выживании растений в экстремальных условиях, обеспечивая другие специфические признаки, такие как качество, урожайность и т. д.

Селекция мутаций представляет собой трехэтапный процесс, состоящий из индукции мутаций, скрининга и отбора предполагаемых кандидатов-мутантов и само мутантное тестирование.

Процессы, основанные на фенотипировании в рамках традиционных стратегий селекции, должны были перейти от базовых методов селекции, основанных на генотипах, к высокому уровню. В таких условиях индуцирующие мутации могут быть использованы для получения культур с желаемыми признаками, которые легко отбираются из запаса зародышевой плазмы.

Ионизирующая радиация может оказывать различные эффекты на генетический материал в зависимости от уровня облучения, которые можно разделить на положительные и отрицательные. В дополнение к вредному воздействию радиации, селекционеры обращают внимание на эффективное применение γ -излучения в своих селекционных программах, так как изменения в селекционных признаках могут передаваться будущим поколениям растений. Ядерные методы начинают применяться в растительной селекции, в основном для индукции мутаций.

Гамма-лучи применяются для индукции мутаций в селекционных исследованиях гораздо чаще, чем химические мутагены. Они способны вызывать различные случайные повреждения ДНК, что, в свою очередь, может привести к различным последствиям: от точечных мутаций до хромосомных аномалий.

В 1901 г. датский генетик Хьюго де Фриз первым ввел термин «мутация» (от лат. *mutatio* – «перемена», «изменение»), чтобы обозначить внезапное изменение признака, которое считается наследуемым. Следовательно, оно передается потомству, а агент, вызывающий мутацию, называется мутагеном.

Коэффициент мутации определяет долю особей, измененных в результате мутационного процесса, к общему числу изучаемых. Он меняется

в зависимости от дозы ИИ для получения мутаций в геноме растений. Важно установить оптимальную величину экспозиционной дозы радиации для индукции мутантов. Анализируя данные из прошлого и настоящего, можно заключить, что дозы в пределах от LD_{30} до LD_{50} (дозы, вызывающие 30–50%-ную гибель) обычно оказываются наиболее результативными в селекционных программах.

F_1 представляет собой первое поколение, с которого начинается процесс отбора. Для выявления мутантов применяются различные методы, включая физические, механические, фенотипические и другие. Когда селекционер обнаруживает мутантную линию, следующим этапом является размножение семян для последующих полевых и других исследований.

Эффективнее отбирать мутантов с высокой частотой мутаций из популяции F_1 , поскольку она состоит из гетерозиготных растений. Это означает, что во время облучения затрагивается только один из аллелей, и отличить рецессивную мутацию в этом поколении невозможно. Поэтому селекционерам необходимо удалять рецессивные мутации в следующих поколениях для выявления гомозигот как по доминантным, так и по рецессивным аллелям.

Конечной целью является отбор желаемых мутантов во втором и третьем поколениях (F_2 и F_3). Поэтому главной задачей является создание мутантов, которые могут стать коммерчески успешными сортами, превосходящими исходные, или новым генетическим материалом с улучшенными характеристиками [6].

Как было отмечено ранее, исследования в сфере мутационной селекции осуществляются в рамках различных проектов, нацеленных на разработку биотехнологических решений для растений, культивирование растительных тканей и использование мутационных методов для создания новых сортов. В этой связи научные исследования и разработки активно интегрируют комбинированные подходы, которые включают *in vitro* культиви-

вирование и молекулярные технологии в сочетании с мутационной селекцией. На текущем этапе применение мутагенеза *in vitro* приобретает особую значимость.

Индукцированный мутагенез представляет собой широко используемый подход для выявления и выделения генов растений в сочетании с молекулярными образцами. Подобные исследования дают четкое представление о взаимосвязях между генами и их функциями, что имеет важное значение для роста и развития растений в различных условиях.

Техники культивирования *in vitro* открывают новые горизонты для обнаружения ценных генотипов. Недавние достижения в области технологии *in vitro* стали значимыми для расширения применения мутационной селекции, что позволяет улучшать существующие сорта и создавать новые как для сельскохозяйственного, так и для декоративного растениеводства, включая комнатное цветоводство.

Известно, что генетическая изменчивость может возникать и без использования мутагенов. Благодаря достижениям в области рекомбинации молекул ДНК, созданной благодаря искусственному соединению двух разных ее фрагментов, гены можно легко клонировать из одного генома в другой.

За счет такой манипуляции в ходе экспериментов можно модифицировать последовательность расположения нуклеотидов в изолированных ДНК-молекулах. В отличие от классического мутагенеза, процесс создания мутаций *in vitro* можно рассматривать как действенный и реальный метод для получения новых генетических вариаций.

Наиболее важной задачей радиационного мутагенеза является выбор подходящей дозы облучения для получения максимальной жизнеспособности и продуктивности. Вначале необходимо оценить значение LD_{50} для оптимизации точной дозы мутации, так как радиочувствительность расте-

ний разных видов меняется в зависимости от сорта и текущей стадии роста и развития.

На сегодняшний день некоторые из важных радиоизотопов, такие как P-32 ($T_{1/2} = 14,3$ дня; β 1,7 МэВ), C-14 ($T_{1/2} = 5570$ лет; β 0,155 МэВ), Са-45 ($T_{1/2} = 165$ дней; β 0,25 МэВ), H₃ ($T_{1/2} = 12,5$ лет; β 0,02 МэВ), Na-22 ($T_{1/2} = 2,6$ дня, β 0,54 МэВ; γ 1,3 МэВ), Na-24 ($T_{1/2} = 15$ ч, β 1,4 МэВ; γ 1,4–2,7 МэВ), Со-60 ($T_{1/2} = 5,2$ года; β 0,31 МэВ; γ 1,2–1,3 МэВ), Си-64 ($T_{1/2} = 13$ ч; β 0,6 МэВ; γ 1,3 МэВ), Fe-59 ($T_{1/2} = 44$ сут.; β 0,27 МэВ; γ 1,3 МэВ), Mn-54 ($T_{1/2} = 314$ сут.; γ 0,84 МэВ), К-42 ($T_{1/2} = 12,5$ ч; β 3,58 МэВ; γ 1,51 МэВ), Rb-86 ($T_{1/2} = 18,68$ сут.; β 1,82 МэВ; γ 1,08 МэВ), S-35 ($T_{1/2} = 89$ сут.; β 0,17 МэВ), Zn-65 ($T_{1/2} = 246$ дней; β 0,32 МэВ; γ 1,12 МэВ), доступны в достаточном количестве и широко используются для исследования ряда проблем, представляющих интерес для сельского хозяйства и других областей.

Они обладают уникальными физическими свойствами, такими как различные параметры излучения, сложная структура треков и распределение дозы по глубине. Ускоренные частицы считаются мощным мутагеном для селекции сельскохозяйственных культур, поскольку они обладают высокой биологической мутагенной эффективностью при относительно низких дозах облучения.

Вывод. Целью селекции растений является изменение или улучшение их генетической структуры для удовлетворения потребностей человека. При мутационной селекции не происходит переноса генов, но хромосомы повреждаются или гены изменяются в структуре ДНК.

Для возникновения естественных мутаций требуются долгие годы. Поэтому создание мутаций с помощью физических и химических мутагенов стало частью селекционных исследований.

Индукция мутаций позволяет на ограниченной основе производить желаемые генетические изменения в зародышевой плазме. Гамма-излучение, являющееся физическим мутагеном, широко используется для

создания разнообразия у многих видов растений и новых вариаций. Следовательно, растущее значение исследований в области селекции растений в сочетании с биотехнологиями и молекулярной генетикой должно удовлетворять потребности растущего населения в продовольственных культурах.

Поэтому методы мутационной селекции с использованием ионизирующей радиации стали часто использоваться в качестве альтернативы методам классической селекции и генетически модифицированных растений. Используя эти передовые геномные методы, селекционеры могут потенциально идентифицировать новые молекулярные механизмы и гены в результате мутагенеза.

Таким образом, недавний прогресс в исследованиях мутационной селекции в отношении с помощью новых технологий очень важно внести новый вклад в программы селекции растений.

Список литературы:

1. Баюров Л.И. Радиационная биология : учебник / Л. И. Баюров. – Краснодар : КубГАУ, 2024. – С. 143-144.
2. Ergün N, Akdogan G, İkinçikarakaya SÜ Impact of gamma radiation on the agronomic properties of naked barley genotypes. September 2023. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences;7(3):650-659.
3. Khatri A, Khan IA, Siddiqui MA & Raza S Evaluation of high yielding mutants of *Brassica juncea* cv. S-9 developed through gamma rays and EMS June 2005Pakistan Journal of Botany 37(2):279-284.
4. Pathirana R. Plant mutation breeding in agriculture. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources. 2011;6:107-126.
5. Schaart JG, van de Wiel CCM, Lotz LAP, Smulders MJM. Opportunities for products of new plant breeding techniques. Trends in Plant Science. 2016;21:438-448.
6. Ulukapı K, Nasırcılar AG. Developments of gamma ray application on mutation breeding studies in recent years. In: International Conference on Advances in Agricultural, Biological & Environmental Sciences; 22–23 July; London. UK; 2015. pp. 31-34.

References

1. Bayurov L.I. Radiacionnaya biologiya : uchebnik / L. I. Bayurov. – Krasnodar : KubGAU, 2024. – S. 143-144.

2. Ergün N, Akdogan G, İkincikarakaya SÜ Impact of gamma radiation on the agronomic properties of naked barley genotypes. September 2023. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences;7(3):650-659.

3. Khatri A, Khan IA, Siddiqui MA & Raza S Evaluation of high yielding mutants of Brassica juncea cv. S-9 developed through gamma rays and EMS June 2005Pakistan Journal of Botany 37(2):279-284.

4. Pathirana R. Plant mutation breeding in agriculture. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources. 2011;6:107-126.

5. Schaart JG, van de Wiel CCM, Lotz LAP, Smulders MJM. Opportunities for products of new plant breeding techniques. Trends in Plant Science. 2016;21:438-448.

6. Ulukapı K, Nasırcılar AG. Developments of gamma ray application on mutation breeding studies in recent years. In: International Conference on Advances in Agricultural, Biological & Environmental Sciences; 22–23 July; London. UK; 2015. pp. 31-34.