

УДК 575.224.46.044:[631.52:635.051

UDC 575.224.46.044:[631.52:635.051

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

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

ХИМИЧЕСКИЕ МУТАГЕНЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЕКЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

CHEMICAL MUTAGENS AND THEIR USE IN CROP SELECTION

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.: 8(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

Обеспечить в полном объеме нормальное существование экспоненциально растущего населения планеты в условиях меняющегося климата является непростой задачей. Для обеспечения продовольствием населения, которое, как ожидается, достигнет к 2050 году более 9 миллиардов человек, необходимо существенно увеличить производство необходимых продуктов питания. Один из наиболее эффективных методов для этого – создание полезных генетических вариаций в растениях, то есть их индуцированный мутагенез. За последние десятилетия он широко применяется для получения необходимых генетических вариантов хозяйственно полезных признаков сельскохозяйственных культур. Для вызывания мутаций у сельскохозяйственных растений можно использовать множество методов, в том числе инсерционные, химические и физические мутагенные воздействия. Индуцированный мутагенез прошел долгий путь с момента эпохальных открытий Германа Мёллера и Льюиса Стадлера. Такие факторы, как абиотический и биотический стресс, вредители, болезни и изменение климата, могут влиять на морфофизиологический и биохимический статус растения и изменять его рост и развитие. Поэтому необходимо проводить мутационные селекционные исследования с использованием химических мутагенов для увеличения генетической изменчивости и получения новых сортов с улучшенными характеристиками (высокая урожайность, устойчивость к вредителям, заболеваниям и т. д.), которые смогут адаптироваться к неблагоприятным климатическим факторам

Ensuring the full normal existence of the exponentially growing global population in a changing climate is not an easy task. In order to provide food for the population, which is expected to reach more than 9 billion people by 2050, it is necessary to significantly increase the production of necessary food products. One of the most effective methods for this is to create beneficial genetic variations in plants, that is, their induced mutagenesis. In recent decades, it has been widely used to obtain the necessary genetic variants of economically useful traits of agricultural crops. A variety of methods can be used to induce mutations in agricultural plants, including insertional, chemical, and physical mutagenic effects. Induced mutagenesis has come a long way since the epochal discoveries of Hermann Moeller and Lewis Stadler. Factors such as abiotic and biotic stress, pests, diseases, and climate change can affect the morphophysiological and biochemical status of a plant and alter its growth and development. Therefore, it is necessary to conduct mutational breeding studies using chemical mutagens to increase genetic variability and obtain new varieties with improved characteristics (high yields, resistance to pests, diseases, etc.) that can adapt to adverse climatic factors

Ключевые слова: СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ КУЛЬТУРЫ, ПРИЗНАКИ, СЕЛЕКЦИЯ, ХЕМОМУТАГЕНЕЗ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ МУТАЦИИ

Keywords: AGRICULTURAL CROPS, TRAITS, SELECTION, CHEMOMUTAGENESIS, INDUCED MUTATIONS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-021>

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/21.pdf>

Введение. Обеспечить в полном объеме нормальное существование экспоненциально растущего населения планеты в условиях меняющегося климата является непростой задачей. Для полного удовлетворения продовольствием населения, которое, как ожидается, достигнет к 2050 г. более 9 млрд. человек, необходимо существенно увеличить производство необходимых продуктов питания. Один из наиболее эффективных методов для этого — создание полезных генетических вариаций в растениях, то есть их индуцированный мутагенез.

За последние десятилетия он широко применяется для получения необходимых генетических вариантов хозяйственно полезных признаков сельскохозяйственных культур. Для вызывания мутаций у сельскохозяйственных растений можно использовать множество методов, в том числе инсерционные, химические и физические мутагенные воздействия. Индуцированный мутагенез прошел долгий путь с момента эпохальных открытий американских генетиков Германа Мёллера и Льюиса Стадлера в 20–30 гг. прошлого столетия.

Вначале мутационное воздействие в первую очередь было основано на физических мутагенах. Тем не менее, постоянно растущий уровень знаний в мутационном воздействии увеличился благодаря открытию химических веществ с мутагенной активностью. Известные ученые Шарлотта Ауэрбах и Джон Робсон (Рабинович) (1942) первыми предоставили подробный отчет о действии химических мутагенов. В частности, они указали, что иприт (горчичный газ) может вызывать мутации, и хромосомные разрывы у плодовых мушек-дрозофил.

С тех пор ученые, работающие над различными аспектами мутагенеза, смогли совершить значительный прорыв в понимании механизма мутагенеза, а также его прикладного значения для практики. Индуцированные мутации рассматриваются как альтернатива естественному генетическому процессу, которые служат источником зародышевой плазмы для программ

улучшения сельскохозяйственных культур, а также как альтернатива гибридизации и рекомбинации в селекции растений.

Мутагены обладают значительным потенциалом для улучшения растений с точки зрения их качественных и количественных характеристик. В свое время член-корреспондент АН СССР Иосиф Абрамович Рапопорт (1966) сообщил о большом числе (более 390) химических мутагенов, использующихся в программах повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Используя химический мутагенез в своих исследованиях, Рапопорт внес значительный вклад, введя в науку термин «микрогенетика», обозначающий информацию о структуре и функциях гена, происхождении мутаций, способе действия мутагена и их закреплении в поколениях [3].

Такие факторы, как абиотический и биотический стресс, вредители, болезни и изменение климата, могут влиять на морфофизиологический и биохимический статус растения и изменять его рост и развитие. Поэтому необходимо проводить мутационные селекционные исследования с использованием химических мутагенов для увеличения генетической изменчивости и получения новых сортов с улучшенными характеристиками (высокая урожайность, устойчивость к болезням и вредителям и т. д.), которые могут адаптироваться к неблагоприятным условиям.

По этой причине следует увеличить количество исследований по определению дозы и продолжительности воздействия мутагенов на виды и сорта растений. Помимо селекции мутаций *in vivo*, мутагены можно применять к частям растений (соматическим частям, таким как листья, побеги и цветы), культивируемым *in vitro*, и с помощью метода культуры тканей можно успешно выводить сорта за короткое время.

Кроме того, следует обратить внимание на молекулярные исследования степени, типа и уровня генетической изменчивости у мутантов, полученных в результате мутаций, а также на идентификацию и обнаружение мутантных генов.

Обсуждение. Для создания генетической изменчивости индуцированный мутагенез является оптимальной и наилучшей альтернативой для луковичных растений, особенно для выведения генетически улучшенных и более адаптивных сортов в условиях меняющегося климата. Выведение новых сортов, устойчивых к различным биотическим и абиотическим стрессам, требует постоянных усилий и внимания селекционеров. Для этого селекционерам необходимо иметь достаточный и широкий генетический вариационный набор зародышевой плазмы, чтобы отбирать лучшие генотипы.

Выведение мутантов может быть альтернативной стратегией селекции, поскольку мутации вызывают наследуемые генетические вариации, которые в конечном итоге служат основой для эволюции новых сортов, форм или видов. Такие вариации могут быть созданы искусственно с помощью различных химических или физических агентов, известных как мутагены.

Мутационная селекция — эффективный и традиционный метод улучшения сельскохозяйственных культур. С помощью современных методов геномики и молекулярных маркеров можно ускорить селекцию, чтобы получить желаемые сорта в условиях изменяющегося климата. Мутагены использовались для индукции генетической изменчивости в растениях уже более 70 лет, что позволило получить в 60 странах мира более 3278 мутантных сортов 261 вида растений с улучшенными характеристиками, такими как урожайность, адаптивность, устойчивость к болезням, качество и устойчивость к абиотическим стрессам.

Этилметансульфонат (ЭМС) (рисунок 1) — один из наиболее часто используемых алкилирующих агентов, который может вызывать химическую модификацию нуклеотидов посредством введения активной алкильной группы, приводящего к изменениям азотистых оснований в молекулах ДНК и мутациям нуклеотидов [6]. Модификации, вызванные алкилирую-

щими агентами, включают 6 атом кислорода и 7-й атом азота в молекуле гуанина; 3-й и 7-й атомы азота – в молекуле аденина, 3-й атом азота, 2-й и 4-й атомы кислорода в тимине, 3-й и 4-й атомы азота и 2-й атом кислорода в молекуле цитозина [5].

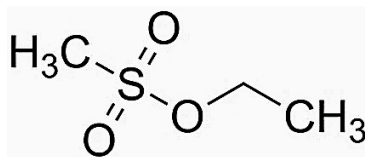


Рисунок 1 – Структурная формула этилметансульфоната (ЭМС)

Развитие ЭМС-мутагенеза способствовало быстрому развитию функциональной геномики растений, позволившей разработать технологий клонирования и направленной индуцированной локальной мутации, которая эффективно сочетает традиционный химический мутагенез с приемом скрининга мутантов. Данный хемомутаген обеспечивает высокую производительность при низких затратах, что значительно ускоряет исследования в области геномики растений, способствуя развитию молекулярной селекции растений, устойчивых к абиотическим стрессам. Однако, следует учитывать и то обстоятельство, что он обладает токсической активностью в условиях *in vivo* и *in vitro*, и поэтому при его использовании необходимо соблюдать приготовление точных концентраций его растворов.

Мутагенез с помощью этилметансульфоната подходит для большинства растений. Для сельскохозяйственных культур, овощей и фруктов целью мутагенеза является получение сортов с превосходными характеристиками. Определив агрономические и качественные характеристики потомства, получают популяцию потомства с видимым типом мутации, после чего проводят дальнейшие исследования функций генов.

Многие важные сельскохозяйственные культуры, такие как пшеница, кунжут, рис, грейпфрут, хлопок и бананы, имеют сорта, полученные в результате мутации. У томатов мутации, основанные на ЭМС, использова-

лись для генерации специфических аллелей, таких как фиолетовый цвет листьев, более мелкие листья и раннее созревание плодов.

Оценка хромосомных aberrаций является важным показателем в селекции мутаций для определения эффективности мутагена, что помогает определить оптимальный уровень дозы мутагена, переносимый данным видом. В исследовании, проведенном учеными индийского университета Шри-Джей-Ти (Shri JLT), изучалось гентоксическое действие ЭМС, метилметансульфоната (ММС), азида натрия (НА) и колхицина на мейотическое деление клеток мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.).

Результаты показали, что эти химические мутагены вызывают различные типы мейотических аномалий, такие как одновалентные, многовалентные хромосомы, слипание хромосом, неориентированные хромосомы, преждевременное движение хромосом, хроматиновые мостики, отстающие хромосомы, ацентрические фрагменты и микроядра.

Также было отмечено значительное влияние хромосомных aberrаций на постмейотический продукт. Были обнаружены нарушенные спорадические хромосомы в форме монад, диад, триад и тетрад. Максимальные хромосомные aberrации наблюдались при более высоких концентрациях мутагенных веществ. Наибольшая доля материнских клеток пыльцы, демонстрирующих мейотические aberrации, была вызвана ЭМС, за которым следовали колхицин, ММС и НА.

Частота жизнеспособной пыльцы снижалась от контроля до максимальной концентрации мутагенов из-за аномалий на предыдущих стадиях. Кроме того, мутагенные вещества снижали процент прорастания и выживаемости. Установлено, что концентрации ЭМС в пределах 0,2–0,3 % оказали наиболее благоприятное действие для проявления значительной цитогенетической изменчивости и среднего уровня летальности, что окажет эффективное воздействие в последующих программах селекции и мутагенеза [4].

Последние молекулярно-биологические данные о составе и структуре хромосом и ядра в сочетании с наблюдениями за хромосомами мутировавших дрожжевых клеток открывают новые перспективы в изучении индуцированной мутагенами слипаемости хромосом и ее связи с их разрывом. Гипотеза, согласующаяся с этими данными, основана на следующих положениях:

1) хромосомная липкость является результатом изменений в специфических негистоновых белках – ферменте топоизомеразе II и периферических белках – как неотъемлемых компонентах хромосом и функция которых необходима для разделения хроматид, причем изменения вызваны либо мутацией в структурных генах белков (наследуемая липкость), либо прямым действием мутагенов на белки (индуцированная липкость);

2) липкость хромосом проявляется в различных степенях (легкой, умеренной, тяжелой, экстремальной), которые определяются количеством затронутых молекул белка-мишени и пораженных молекул в данном участке хромосомы;

3) является результатом молекулярных процессов, происходящих в течение ряда фаз митоза (включая интерфазу), но могут проявляться только в метафазе и анафазе;

4) вызывает хромосомные aberrации за счет физического растяжения и разрыва хроматид в местах сцепления. Следовательно, разрыв, возникающий в результате сцепления, является вторичным эффектом, требующим продолжения в анафазе, в отличие от разрыва, возникающего в результате прямого воздействия мутагенов на ДНК.

В последние годы были предприняты различные попытки выращивать культуры, устойчивые к гербицидам, которые обычно губительны для сорняков. Для генетической модификации культур с целью выращивания устойчивых к гербицидам культур использовались различные научные методы. Устойчивость к гербицидам была обнаружена у многих сельскохо-

зяйственных культур, таких как кукуруза, пшеница, хлопок, сорго, подсолнечник, чечевица и соя. В целом, вывести культуры, устойчивые к высоким дозам гербицидов, непросто. Для этого применяются новые стратегии крупномасштабного скрининга мутагенных популяций, ремутация независимо выделенных мутаций, скрининг и полимеризация генов, а также отбор гипотетических устойчивых к гербицидам мутантов у различных сельскохозяйственных культур.

Пшеница (*Triticum aestivum*) — одна из древнейших культур в мире, которая на протяжении более 8 тыс. лет использовалась в качестве продовольственной культуры в Северной Африке, Западной Азии и Европе. Сегодня пшеница является одним из важнейших источников зерна для людей и выращивается на больших площадях, чем любая другая культура. По мере роста населения и увеличения засоленности почв селекционеры стремятся вывести солеустойчивые сорта, чтобы удовлетворить растущий спрос на урожай и качество зерна.

Это — вторая по значимости сельскохозяйственная культура в мире, урожай которой в 2023 г. составил около 786 млн тонн. Только кукурузы было собрано больше — около 1,210 млрд. тонн. Пшеницу выращивают из-за ее высокой урожайности и полезных свойств, в частности, содержания белка, углеводов, клетчатки, жиров, минералов и витаминов группы В.

В ходе обработки 7%-ным раствором ЭМС семян высокоурожайного сорта пшеницы DPW 621-500 индийскими и шведскими учеными были получены новые мутантные популяции. В последовательных генерациях в пределах популяции наблюдались значительные различия в фенотипических признаках, включая высоту растения, количество побегов, длину колоса и количество зерен в нем.

Кроме того, было проведено исследование содержания основных минеральных веществ — железа, цинка, кальция и меди. Среди 423 мутантов у 94 растений был повышен уровень содержания этих минералов с

учетом их концентрации. Эти результаты свидетельствуют о значительном потенциале этих мутантных форм для включения в программы биообогащения пшеницы и возможности повышения не только содержания питательных веществ, но и других важных агрономических характеристик [10, 11].

Индийскими учеными были исследованы мультигенные мутации, индуцированные азидом натрия у перспективного сорта пшеницы HD-2733 в течение двух последовательных вегетационных сезонов. Для химической обработки 100 генетически чистые семена замочили в дистиллированной воде на 6 ч, затем высушили и обработали растворами азидата натрия в концентрациях 0,02, 0,04 и 0,06. В лабораторных условиях наблюдали за прорастанием, длиной корней и побегов. Среди различных концентраций раствора азидата натрия контроль показал самую высокую всхожесть (99,5 %); затем 0,02 % (97,1); 0,04 % (95,5) и 0,06 % (85,8 %).

Высокая концентрация азидата натрия снизила процент прорастания, длину корней и побегов, а пониженная привела к увеличению прорастания, длины корней и побегов, сравнимому с контрольной группой. Генотипическая и фенотипическая изменчивость, наследуемость и величина генетического прироста для различных полигенных признаков уменьшались с увеличением концентрации азидата натрия. Однако наблюдались положительные и отрицательные изменения в средних значениях признаков, связанных с урожайностью, по сравнению с контролем.

Несколько мутантных линий (8 линий более раннего созревания, одна линия по высоте растения, по 3 линии размера колоса и массы зерна и 4 линии по массе зерна) оказались очень перспективными. Азид натрия в концентрации 0,02% оказался наиболее эффективным мутагеном для индуцирования микромутаций в признаках, влияющих на урожайность. Был сделан вывод, что он эффективен для устранения дефектов и получения более высокоурожайных линий [16].

В исследовании, проведенном индийскими учеными во главе с Гульфишаном Мохдом, изучалось действие растворов метилметансульфоната (ММС) и диэтилсульфата (ДЭС) на семена *стручкового перца* (*Capsicum annuum* L. var. G4). В поколении F₁ было изучено их влияние на мейоз, частоту хиазм и оплодотворяющую способность пыльцы. Во всех вариантах наблюдались различные типы мейотических aberrаций: одновалентные, многовалентные, слипание, «мостики» и т. д. Однако при этом обработка ММС оказалась более эффективной в сравнении с ДЭС особенно на стадии метафазы. С увеличением концентрации наблюдалось снижение частоты хиазм и фертильности пыльцы во всех вариантах обработки. И в этом случае обработка ММС также оказалась более эффективной, чем ДЭС [13].

Согласно официальным данным, опубликованным в рамках проекта ФАО/МАГАТЭ, на сегодняшний день с помощью метода мутагенеза было выведено 16 сортов *сладкого перца* (*Capsicum annuum*). В мутагенезе перца в нескольких исследованиях использовались высококачественные мутантные популяции, полученные с помощью ЭМС. В частности, мутантный сорт сладкого перца «Маоэр» был выведен для изучения генов, регулирующих строение цветка и самого растения [15].

Кукуруза (*Zea mays* L.) — одна из важнейших сельскохозяйственных культур во всем мире, имеющая пищевое, техническое и кормовое значение. Индийские исследователи факультета цитогенетики и селекции растений Аннамалайского университета под руководством С. Гнанамурти, обрабатывали в течение 6 ч семена кукурузы торговой марки ЖКМН-1001 различными концентрациями химических мутагенов: ЭМС, ДЭС и НА (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 100 мМ).

Полулетальное действие было получено при действии 50 мМ ЭМС и по 40 мМ ДЭС и азида натрия. При этом наблюдалось значительное ухудшение морфологических и продуктивных характеристик (всхожесть семян,

выживаемость рассады, количество дней до появления первой метелки, высота растения, количество листьев на растении, количество метелок на растении, количество зерен, длина и ширина початков, масса 100 зерен, урожайность зерна с растения, вес зеленой и высушенной массы растения).

В результате оказалось, что применение концентраций 50 мМ ЭМС и по 40 мМ ДЭС и азида натрия сыграли стимулирующую роль в индуцированной мутации, благодаря которой улучшились качественные и количественные характеристики кукурузы. Однако, увеличение концентрации примененных мутагенов привело к ухудшению фенотипических признаков и урожайности, что объясняется физиологическими нарушениями или хромосомными аномалиями, вызванными мутагенами в клетках растения [7].

Применение химических мутагенов в качестве важных факторов успешной гаплоидии у огурца стало темой исследования, проведенного турецкими учеными. Изучалось влияние генотипа, возраста мужских цветков, растения-реципиента и химического мутагенеза под действием азида натрия и колхицина на деактивацию пыльцы, а также количество семян (общее, полноценных, полуполноценных и пустых) и морфологические признаки.

На основании проведенного опыта установлено, что мутагенные обработки в дозе 0,005 колхицина и 0,0012 NaN_3 привели к самым высоким значениям развития морфологических признаков и урожайности плодов у контрольных растений, в то время как повышенные концентрации (0,01 и 0,025 –соответственно) привели к существенному снижению значений этих признаков. Кроме того, у растений, обработанных мутагенами, присутствовало больше неоплодотворенных семян [8].

Подсолнечник (*Helianthus annuus* L.) – одна из важнейших масличных культур в мире, которая выращивается в более чем 70 странах по всему миру на площади около 20 млн га, из которых 9,8 млн га приходится на

Российскую Федерацию (2023). Морфологические и физиологические изменения приводят к происходит активация зародыша и прорастание семян. Урожайность растения зависит от состояния семян.

Было исследовано влияние различных концентраций химических мутагенов – этилметансульфоната (0,05; 0,15 и 0,20 %) и азида натрия (0,01; 0,02 и 0,03 %) по сравнению с контролем. Обработка ЭМС выявила тенденцию к постепенному увеличению всхожести от 90 до 94 % от более высоких до более низких доз. Процент прорастания был в пределах от 96 до 90 % в зависимости от концентрации раствора ЭМС.

Обработка азидом натрия привела к снижению всхожести семян. Прорастание в процентах колебалось от 68 до 72 %. В проведенном исследовании снижение или стимуляция прорастания семян может быть связано с воздействием мутагенов на их меристему. Снижение у семян всхожести при тем более высоких дозах концентрации мутагенов связывается с нарушениями на клеточном физиологическом уровне. В то же время мутации способствовали изменению генома и привели к появлению ряда штаммов, превосходивших свои исходные родительские формы [9].

Род *Allium* — один из крупнейших родов однодольных растений, насчитывающий 1000 видов, имеющих коммерческое и экономическое значение. *Allium cepa* L. (лук репчатый) и *Allium sativum* L. (чеснок) — наиболее важные виды этого рода, которые культивируются и употребляются в пищу по всему миру. Несмотря на это, в отношении этих культур было проведено не так много систематических и целенаправленных исследований из-за таких ограничений, как двухлетний цикл, высокая скрещиваемость, несовместимость при скрещивании или половом размножении, облигатная апомиктичность (то есть способность зародыша развиваться из неоплодотворенной завязи), большой размер генома, высокая гетерозиготность и т. д.

Химический мутагенез чеснока способствует созданию новых форм с устойчивыми характеристиками, улучшенными показателями и повышенной урожайностью. Обработка луковиц мутагенами концентрацией 0,05 % диэтилсульфата и 0,02–0,04 % диметилсульфата способствовала увеличению морфометрических показателей мутантов, позволила значительно увеличить урожайность культуры в опытных группах от 27 до 67 % по сравнению с контрольной группой, а также обеспечила высокую наследуемость селекционируемых признаков [2].

В процессе скрининга мутантов некоторые физиологические показатели могут использоваться в качестве индексов устойчивости к стрессу для повышения устойчивости в различных стрессовых условиях. С. Ли и др. [12] индуцировали мутацию редиса с помощью ЭМС, что позволило получить полезные характеристики новых сортов редиса. Семена редиса сорта DY13 были обработаны 0,5%-ным раствором ЭМС для получения стерильности у мутантов. В результате этого была выведена стерильная мужская линия, позволяющая в будущем использовать новый эффективный метод отбора стерильных мужских линий редиса.

Горох посевной (*Lathyrus oleraceus*) является важной зернобобовой культурой благодаря своему богатому питательному составу и вкладу в устойчивое развитие сельского хозяйства. В последнее время ему уделяется большое внимание как потенциальному ведущему источнику растительного белка. С агрономической точки зрения существует потребность в повышении урожайности гороха и улучшении содержания белка и крахмала в семенах для коммерческих и пищевых целей.

Существует также значительный, но пока не реализованный потенциал биоусиления минеральных веществ в этой культуре, что значительно улучшит ее питательную ценность. Однако использование гороха в качестве источника белков ограничено относительно невысоким содержанием белка, антипитательными факторами и высоким содержанием компонен-

тов, ухудшающих вкус. Наличие генетических вариаций с желаемыми характеристиками качества семян является основой для устойчивого развития сортов гороха с повышенным содержанием и качеством белка. Мутагенез был важным инструментом в исследованиях функциональных характеристик генов и создании генетической изменчивости для селекции сельскохозяйственных культур.

Крупномасштабный мутагенез культуры с использованием физических и химических агентов требует тщательного отбора мутагена и оптимизации его дозы для увеличения частоты мутаций. В исследовании, проведенном канадскими исследователями, по химическому мутагенезу под воздействием этилметансульфоната (ЭМС), установлено, что концентрация 5 мМ этого мутагена была наиболее оптимальной для полевого гороха. Полученные результаты исследования можно использовать в крупномасштабной мутагенной популяции для улучшения сортов гороха [14].

Кофе является одним из самых ценных товарных культур и обеспечивает занятость для миллионов людей во всем мире, особенно в Латинской Америке и ряде регионов Африки и юго-восточной Азии. Кофе принадлежит к семейству *Rubiaceae* и двум основным видами культивируемого кофе являются *Coffea arabica* L. и *Coffea canephora*.

Кофе часто поражается листовой ржавчиной — грибковым заболеванием, вызываемым *Hemileia vastatrix*. Поскольку это — многолетняя культура, традиционная селекция затруднена из-за его длительного возраста достижения плодоношения (как правило, на 3–5-й пятый год) и специфики генома. Поэтому мутанты этой культуры являются важным ресурсом для дальнейшей селекции и исследований в области функциональной геномики.

Культивирование клеток и тканей *in vitro* в сочетании с индукцией мутаций представляет собой привлекательный подход для расширения генетической базы и селекционных целей, особенно для многолетних куль-

тур, таких как арабика. Культуры эмбрионных клеток являются подходящими объектами для индукции мутаций и могут ускорить развитие мутантных растений без химер. Кривые «доза–эффект» были установлены в течение 3–4 недель и показали летальность клеточных суспензий в величинах ЛД₃₀ и ЛД₅₀ под воздействием концентраций ЭМС 0,5 и 0,6 % – соответственно.

В нашей стране в различные годы также проводились исследования по использованию химического мутагенеза. Некоторые из них отражены в таблице.

Таблица – Мутагенные дозы ряда химических мутагенов для сельскохозяйственных культур [1]

Мутаген	Культура	Сорт	Доза
1	2	3	4
Этиленимин	Пшеница озимая	Краснозерная	0,03–0,06
	Яровая пшеница	Теремок, Цезиум	0,02–0,04
	Ячмень	Винер	0,04
	Рожь	Анеуплоидная	0,05
	Кукуруза	Линии ВИР-40, ВИР-48	0,05
	Горох	Крупноплодный 20	0,02–0,06
	Подсолнечник	1346	0,05
	Картофель, семена	Камераз 1	0,01
	Томаты	Разные сорта	0,01–0,04
	Сахарная свекла	Разные сорта	0,05
	Виноград, семена	Разные сорта	0,02–0,2
	Виноград, черенки	Разные сорта	0,005–0,05
Диметилсульфат	Ячмень	Луч	0,025–0,2
	Горох	Капитал, Немчиновская 51	0,01–0,03
	Подсолнечник	1646	0,15
	Виноград, семена	Разные сорта	0,2–0,5
	Виноград, черенки	Разные сорта	0,1–0,5
	Черешня, абрикос, персик	Семена и почки	0,004
Диэтилсульфат	Пшеница	Искра	0,004
	Кукуруза	Линии ВИРа	0,2
	Горох	Капитал	0,01–0,03
	Подсолнечник	Сорт 1646	0,2
1,4–бисдиазоацетилбутан	Кукуруза	Линии ВИРа	0,1
	Горох	Суповая лопаточка	0,25–1,0
	Подсолнечник	1646	0,1

Нитрозометилмочевина	Кукуруза	Линии и сорта ВИРа	0,0001
	Горох	Крупноплодный Г-20	0,0001
	Подсолнечник	1646	0,0001
	Виноград	Черенки разных сортов	0,0001
	Черешня, абрикос, персик	Семена и почки	0,002

Продолжение таблицы

Нитрозоэтилмочевина	Пшеница	Украина	0,015–0,07
	Ячмень	Мутант 104-146	0,025–0,05
	Кукуруза	Линии и сорта ВИРа	0,001
	Горох	Суповая лопаточка	0,063
	Подсолнечник	1646	0,001
	Виноград	Семена разных сортов	0,2–0,002
	Виноград	Черенки разных сортов	0,0001–0,00001
	Черешня, абрикос, персик	Семена и почки разных сортов	0,004
Этилметансульфонат	Ячмень	Винер	0,2
	Кукуруза	Линии ВИРа	0,1
	Горох	Торсдаг	0,2

Выводы. Хемомутагены – это химические соединения, такие как этилметансульфонат, метилметансульфонат, азид натрия, которые вызывают наследственные изменения в геноме. Мутации происходят, когда они остаются незамеченными клеточными механизмами корректировки и репарации, а механизмы восстановления перегружены тяжелыми повреждениями. Благодаря клеточной репликации эти мутации закрепляются в последующих поколениях.

На воздействие мутации влияют несколько факторов, включающие ген-мишень, тип мутации, дозу мутагена, чувствительность организма-мишени и усугубляющие эффекты ранее существовавших мутаций. Таким образом, мутация в индуцированном нетранслируемом участке ДНК не будет иметь никакого эффекта, тогда как она в активно транскрибируемом

участке может влиять на экспрессию генов и даже приводить к гибели клеток (летальная мутация).

Однако частота спонтанных мутаций крайне мала и недостаточна для достижения желаемых целей селекции. Поэтому чтобы увеличить частоту мутаций при обработке различных частей растений используются различные химические мутагены. Известно, что индуцированные мутации увеличивают частоту спонтанных мутаций. В 10–100 раз, тем самым повышая шансы на выделение большего числа мутантов с улучшенными признаками. Растения сталкиваются с широким спектром стрессов, вызванных окружающей средой, и для преодоления пагубных последствий таких стрессов требуются изменения во вторичных метаболитах.

Индуцированные мутации могут играть решающую роль в развитии растений, которые проявляют повышенную устойчивость к целому ряду биотических и абиотических стрессов. В последнее время индуцированные мутации рассматриваются как лучший вариант для увеличения генетической изменчивости сельскохозяйственных культур с узкой генетической базой, а также как альтернатива традиционным методам селекции. Индуцированные мутации также используются для открытия новых генов, изучения структуры и функций генов и их роли в регуляции жизненно важных биохимических процессов.

Список литературы:

1. Дудин Г.П. Индуцированный мутагенез и использование его в селекции растений / Г. П. Дудин, В. Н. Лысков. – Киров, 2009. – 207 с.
2. Немтинов В.И. Оценка мутагенных образцов чеснока озимого / В. И. Немтинов, Ю. Н. Костанчук // Овощи России. – 2023. – № 3. – С. 29.
3. Рапопорт И.А. Микрогенетика / И. А. Рапопорт. – М., 1965. – С. 130–141.
4. Alam Q, Khah MA, Ahmad Azad RA Comparative analysis of different chemical mutagens in inducing chromosomal aberrations in meiotic cells of *Triticum aestivum* L. *Cytologia*, 2022, Volume 87, Issue 2, P. 99-105.
5. Fu D, Calvo JA, Samson LD Balancing repair and tolerance of DNA damage caused by alkylating agents. *Nat. Rev. Cancer*. 2012. 12 (2), 104-120.
6. Gillmor CS, Lukowitz W (2020). EMS mutagenesis of *Arabidopsis* seeds, in «Plant embryogenesis» (Springer), 15-23.

7. Gnanamurthy S., Dhanavel D., Girija M., Pavadai P and Bharathi, T. Effect of Chemical mutagenesis on Quantitative traits of Maize (*Zea mays* (L.)). *International Journal of Research in Botany* 2012; 2(4): 34-36.
8. Hazem, F and Golabadi, M (2018) Use of chemical mutagens for production of inactive pollen grains, embryo rescue, and morphological changes in cucumber. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*: Vol. 42: No. 1, Article 2, pp. 11-21.
9. Jamdhade VP., Kashid NG. Effect of Physical and Chemical Mutagenesis in Sunflower [*Helianthus annuus* L.] on Seed Germination through Induced Mutation. *International Journal of Science and Research*, Volume 5, Issue 6, June 2016, Pages: 1762-1764.
10. Kumar N, Nayak JK, Pal N, et al. Development and characterization of an EMS-mutagenized population of wheat (*Triticum aestivum* L.) for agronomic trait variation and increased micronutrients content. *Cereal Research Communications*. Original Paper. Published: 16 May 2024. DOI:10.1007/s42976-024-00525-3.
11. Lethin J., Shakil S.S.M., Hassan S. et al. Development and characterization of an EMS-mutagenized wheat population and identification of salt-tolerant wheat lines. *BMC Plant Biol* 20, 18 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2137-8>
12. Li S, Zhang N, Li J, et al. (2019). A new male sterile line of «Duanye-13» radish (*Raphanus sativus* L.) produced by ethyl methanesulfonate mutagenesis. *Genet. Resour. Crop Evol.* 66 (5), 981-987.
13. Mohd G, Khan AH, Jafri IF, Bhat TA Assessment of mutagenicity induced by MMS and DES in *Capsicum annuum* L. *Saudi Journal of Biological Sciences*, Volume 19, Issue 2, April 2012, P. 251-255.
14. Pandey PK, Bhowmik P, Kagale S Optimized methods for random and targeted mutagenesis in field pea (*Pisum sativum* L.) *Front Plant Sci.* 2022 Sep 8;13:995542. doi: 10.3389/fpls.2022.995542. eCollection 2022.
15. Siddique MI, Back S, Lee JH, et al. (). Development and characterization of an ethyl methane sulfonate (EMS) induced mutant population in *Capsicum annuum* L. *Plants* 2020; 9(3), P. 396.
16. Srivastava P, Marker S, Pandey P and Tiwari DK Mutagenic effects of sodium azide on the growth and yield characteristics in wheat (*Triticum aestivum* L EM. Thell). January 2011 *Asian Journal of Plant Sciences* 10(3):190-201.

References

1. Dudin G.P. Inducirovannyj mutagenez i ispol'zovanie ego v selekcii rastenij / G. P. Dudin, V. N. Lysikov. – Kirov, 2009. – 207 s.
2. Nemtinov V.I. Ocenka mutagennyh obrazcov chesnoka ozimogo / V. I. Nemtinov, YU. N. Kostanchuk // *Ovoshchi Rossii*. – 2023. – № 3. – S. 29.
3. Rapoport I.A. Mikrogenetika / I. A. Rapoport. – M., 1965. – S. 130–141.
4. Alam Q, Khah MA, Ahmad Azad RA Comparative analysis of different chemical mutagens in inducing chromosomal aberrations in meiotic cells of *Triticum aestivum* L. *Cytologia*, 2022, Volume 87, Issue 2, P. 99-105.
5. Fu D, Calvo JA, Samson LD Balancing repair and tolerance of DNA damage caused by alkylating agents. *Nat. Rev. Cancer*. 2012. 12 (2), 104-120.
6. Gillmor CS, Lukowitz W (2020). EMS mutagenesis of *Arabidopsis* seeds, in «Plant embryogenesis» (Springer), 15-23.
7. Gnanamurthy S., Dhanavel D., Girija M., Pavadai P and Bharathi, T. Effect of Chemical mutagenesis on Quantitative traits of Maize (*Zea mays* (L.)). *International Journal of Research in Botany* 2012; 2(4): 34-36.

8. Hazem, F and Golabadi, M (2018) Use of chemical mutagens for production of inactive pollen grains, embryo rescue, and morphological changes in cucumber. Turkish Journal of Agriculture and Forestry: Vol. 42: No. 1, Article 2, pp. 11-21.
9. Jamdhade VP., Kashid NG. Effect of Physical and Chemical Mutagenesis in Sunflower [*Helianthus annus* L.] on Seed Germination through Induced Mutation. International Journal of Science and Research, Volume 5, Issue 6, June 2016, Pages: 1762-1764.
10. Kumar N, Nayak JK, Pal N, et al. Development and characterization of an EMS-mutagenized population of wheat (*Triticum aestivum* L.) for agronomic trait variation and increased micronutrients content. Cereal Research Communications. Original Paper. Published: 16 May 2024. DOI:10.1007/s42976-024-00525-3.
11. Lethin J., Shakil S.S.M., Hassan S. et al. Development and characterization of an EMS-mutagenized wheat population and identification of salt-tolerant wheat lines. BMC Plant Biol 20, 18 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2137-8>.
12. Li S, Zhang N, Li J, et al. (2019). A new male sterile line of «Duanye-13» radish (*Raphanus sativus* L.) produced by ethyl methanesulfonate mutagenesis. Genet. Resour. Crop Evol. 66 (5), 981-987.
13. Mohd G, Khan AH, Jafri IF, Bhat TA Assessment of mutagenicity induced by MMS and DES in *Capsicum annuum* L. Saudi Journal of Biological Sciences, Volume 19, Issue 2, April 2012, P. 251-255.
14. Pandey PK, Bhowmik P, Kagale S Optimized methods for random and targeted mutagenesis in field pea (*Pisum sativum* L.) Front Plant Sci. 2022 Sep 8;13:995542. doi: 10.3389/fpls.2022.995542. eCollection 2022.
15. Siddique MI, Back S, Lee JH, et al. (). Development and characterization of an ethyl methane sulfonate (EMS) induced mutant population in *Capsicum annuum* L. Plants 2020; 9(3), P. 396.
16. Srivastava P, Marker S, Pandey P and Tiwari DK Mutagenic effects of sodium azide on the growth and yield characteristics in wheat (*Triticum aestivum* L EM. Thell). January 2011 Asian Journal of Plant Sciences 10(3):190-201.