

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 631/635

DOI 10.17513/use.38384

МЕТОДЫ ИНТРОДУКЦИИ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА СУЩЕСТВЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ РАСТЕНИЙ

Дабиева У.М.

*ФГБОУ ВО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия
имени В.Р. Филиппова», Улан-Удэ, e-mail: yrandabieva@mail.ru*

Сегодня существует необходимость подробного рассмотрения методов интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений с учетом современных достижений науки. Целью настоящей работы является обзор и обобщение исследований по изучению методов интродукции с существенным изменением наследственности растений. При рассмотрении и кратком обзоре этих методов автором использованы методы систематизации, анализа и синтеза научной литературы. При исследовании использованы базы данных о новых мутантных сортах совместного объединенного центра «Международного агентства по атомной энергии» и «Продовольственной и сельскохозяйственной организации объединенных наций». Временной промежуток научных источников – с 1925 по 2024 г. При этом проанализировано более 80 источников, но наиболее актуальными оказались 56 из них, которые указаны в списке литературы. Известно, что методы с существенным изменением наследственности растений подразделяются на следующие три подхода: метод ступенчатой акклиматизации; методы отдаленной гибридизации; методы модификации геномов растений. Обзор литературы по методу ступенчатой акклиматизации растений показал, что он является весьма длительным процессом и в настоящее время используется для весьма ценных видов растений, а также для дендрофлоры северных регионов. Сегодня метод отдаленной гибридизации на основе подхода получения гаплоидных культур используется для создания новых сортов растений. Учитывая современные достижения науки, автор предлагает включить в методы интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений методы модификации геномов растений, которые включают в себя следующие подходы: индуцированный мутагенез, метод использования биологических мутагенов, а также трансгенез. Таким образом, в настоящее время методы интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений получили значительный импульс в развитии, появились новые сорта культурных растений, которые можно использовать для их интродукции в различных климатических условиях.

Ключевые слова: интродукция, методы, наследственность, гибридизация, ступенчатая, трансгенез, мутагенез, индуцированный

INTRODUCTION METHODS AIMED AT SIGNIFICANT CHANGES IN PLANT HEREDITY

Dabieva U.M.

*V.R. Filippov Buryat State Agricultural Academy,
Ulan-Ude, e-mail: yrandabieva@mail.ru*

Today, there is a need for a detailed review of the methods of introduction with a significant change in the heredity of cultivated plants, taking into account modern scientific achievements. The purpose of this work is to review and summarize research on the study of methods of introduction with a significant change in plant heredity. When reviewing and briefly reviewing these methods, the author used methods of systematization, analysis and synthesis of scientific literature. The study used databases on new mutant varieties from the joint center of the International Atomic Energy Agency and the Food and Agriculture Organization of the United Nations. The time period of the scientific sources is from 1925 to 2024. At the same time, more than 80 sources were analyzed, but the most relevant were 56 sources listed in the list of references. It is known that methods with significant changes in plant heredity are divided into the following three approaches: the method of stepwise acclimatization; methods of remote hybridization; methods of modification of plant genomes. A review of the literature on the method of stepwise acclimatization of plants has shown that it is a very long process, and it is currently used for very valuable plant species, as well as for the dendoflora of the northern regions. Today, the method of remote hybridization based on the haploid crop production approach is used to create new plant varieties. Taking into account modern scientific achievements, we propose to include in the methods of introduction with a significant change in the heredity of cultivated plants the item: methods of modification of plant genomes, which include the following approaches: induced mutagenesis, the method of using biological mutagens, as well as transgenesis. Thus, at present, the methods of introduction with a significant change in the heredity of cultivated plants have received a significant boost in development, new varieties of cultivated plants have appeared that can be used for their introduction in various climatic conditions.

Keywords: introduction, methods, heredity, hybridization, stepwise, transgenesis, mutagenesis, induced

Введение

В переводе с латинского *introduction* означает «введение, приведение». При этом обращает на себя внимание перевод слов *intro* – «входить, вникать, углубляться» и «*ductio*» – «ведение, увод, отведение» [1, с. 56]. Известно также словосочетание *in cultural introductus*, которое переводится как «введенный в культуру» [2, с. 84]. В соответствии с терминами и понятиями, принятыми Советом ботанических садов СССР в 1971 г. под *интродукцией растений* понимается целеустремленная деятельность человека по введению в культуру в данном естественно-историческом районе растений (родов, видов, подвидов, сортов и форм), ранее в нем не произраставших, или перенос их из местной флоры [3].

Учитывая, что теоретические изыскания в области теории интродукции растений в основном проводились в советский период, в настоящей работе автор попытался провести анализ перспектив развития методов интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений, оценить их прикладное значение для сельского хозяйства с учетом анализа библиографических данных и определить степень изученности предложенных методов интродукции, а также изучить современные достижения науки в теории и практике по этим подходам.

Целью настоящей работы является обзор и обобщение исследований по изучению методов интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений.

Материалы и методы исследования

При рассмотрении и кратком обзоре этих методов автором использованы методы систематизации, анализа и синтеза научной литературы по теме исследования. При исследовании использованы базы данных о новых мутантных сортах совместного центра объединенного центра «Международного агентства по атомной энергии» и «Продовольственной и сельскохозяйственной Организации объединенных наций». Временной промежуток научных источников – с 1925 по 2024 г. При этом проанализировано более 80 источников, но наиболее актуальными оказались 56 из них, которые указаны в списке литературы. Настоящая работа основана на современных принципах подготовки современных обзоров по протоколу PRISMA [4].

Результаты исследования и их обсуждение

В 1957 г. известный советский ученый С.Я. Соколов выделял два основных подхода к интродукции культурных растений [5, с. 25]: методы предварительного выбора интродуцентов; методы непосредственной интродукции растений.

При этом методы непосредственной интродукции растений делятся на две основные категории: методы без существенного изменения наследственности растений; методы с существенным изменением наследственности растений, которые нужны для успешной интродукции растения в новых почвенно-климатических условиях. Методы интродукции, направленные на существенные изменения наследственности растений, указанные С.Я. Соколовым [5, с. 25] и Н.А. Базилевской [6, с. 112], несколько различаются. С.Я. Соколов выделяет пять подходов: ступенчатую акклиматизацию; изменение наследственности по стадии яровизации; изменение наследственности по световой стадии; вегетативную гибридизацию; половую гибридизацию, включая отдаленную, с направленной культурой гибридов. Н.А. Базилевская выделяет только два метода: ступенчатую акклиматизацию и метод отдаленной гибридизации, половой и вегетативный. В работе автор будет руководствоваться методами интродукции, направленными на существенные изменения наследственности растений, указанными Н.А. Базилевской. Однако, учитывая, что в последние несколько десятилетий произошли кардинальные изменения в методах модификации геномов растений, автор посчитал, что необходимо внести в методы интродукции, направленные на существенные изменения наследственности растений, еще один пункт: возможное использование методов модификации геномов растений в целях их интродукции, которые включают такие подходы как индуцированный мутагенез; мутагенез с помощью биологических мутагенов, трансгенез (табл. 1). Все эти методы рассмотрены ниже более подробно.

Метод ступенчатой акклиматизации. Известно, что метод ступенчатой акклиматизации открыл А. Гумбольдт, и это отмечал А. Декандоль, в России он был применен И.В. Мичуриным при интродукции абрикоса [6, с. 112]. Этот метод предполагает постепенный сдвиг растений к северу для их адаптации к более холодным условиям климата.

Таблица 1

Методы интродукции, направленные
на существенные изменения наследственности растений

Методы интродукции, направленные на существенные изменения наследственности растений		
Соколов С.Я.	Базилевская Н.А.	
1. Ступенчатая акклиматизация. 2. Изменение наследственности по стадии яровизации. 3. Изменение наследственности по световой стадии. 4. Вегетативная гибридизация. 5. Половая гибридизация, особенно отдаленная, с направленной культурой гибридов	1. Ступенчатая акклиматизация. 2. Метод отдаленной гибридизации, половой и вегетативный	Возможное использование методов модификации геномов растений в целях их интродукции: – индуцированный мутагенез; – мутагенез с помощью биологических мутагенами; – трансгенез

В 1963 г. предлагалось создать целую систему ступенчатой акклиматизации растений сначала в масштабах нескольких регионов, а затем постепенно перейти на все-союзный уровень. На начальном этапе организации ступенчатой акклиматизации предлагались конкретные растения, которые необходимо интродуцировать: персик, черешня, актинидия, виноград амурский, грецкий орех, орех черный, фундук, орех уссурийский, лещина дальневосточная, миндаль, каштан посевной, лавр благородный, каштан зубчатый, эвкоммия вязолистная, лимонник китайский, соя, которые можно было продвигать с южных территорий в Москву, Ленинград, Минск, Киев, Томск и т.д. Предлагалось также методом ступенчатой акклиматизации продвигать на северные территории или северно-восточные территории европейской части страны многие кормовые культуры, древесные породы и декоративные растения [6, с. 113]. С другой стороны, говорилось, что недостаточно были разработаны методы ступенчатой акклиматизации территории растений Урала и Сибири, особенно для зерновых культур, прежде всего озимой пшеницы, плодово-ягодных, кормовых лекарственных и других растений [7].

Вместе с тем в то же время известный ботаник А.Л. Лыпа утверждал, что существуют разногласия по поводу применимости ступенчатой акклиматизации растений, учитывая, что такие работы до 1963 г. не проводились. С одной стороны, исследователи говорили о длительности и неэффективности применения ступенчатой акклиматизации растений, но, оппонировав им, А.Л. Лыпа приводил в пример опыт И.В. Мичурина, в котором ученому удалось интродуцировать абрикос на 700 км севернее Ро-

стова всего за 12 лет по двум географическим ступеням [8].

В контексте географических аспектов акклиматизации растений, то есть их способности адаптироваться к более холодным климатическим условиям в течение одного поколения, были проведены исследования, касающиеся грецкого ореха. Согласно данным, представленным Ф.Л. Щепотьевым, максимальная дистанция, на которую может быть успешно продвинут грецкий орех в холодные регионы, составляет 500 км [9, с. 74].

Работы, которые велись с 1963 г. по акклиматизации в Центральном сибирском ботаническом саду г. Новосибирска винограда амурского (*Vitis amurensis* Rupr.) показали, что, несмотря на значительные различия климатических условий произрастания, он был оценен как перспективный для интродукции в Новосибирской области [10].

В целом несмотря на теоретическую правильность метода ступенчатой акклиматизации растений, практическое его применение является, по мнению Н.А. Базилевской, очень трудоемким и длительным процессом, и целесообразно его использование только для весьма ценных видов растений [6, с. 114].

Тем не менее в настоящее время метод ступенчатой акклиматизации получил развитие в работах по интродукции дендрофлоры северных регионов [11, с. 35; 12]. Ученые-северяне (Н.А. Бабич, М.М. Андропова и др.) указывают, что на значительное увеличение эффективности интродукции растений влияют границы и условия естественного ареала произрастания вида, и географическое направление интродукции, которые определяют такие значимые детерминанты теории ступенчатой акклиматизации, как первая ступень акклиматизации, величина интродукционной ступени [13, с. 67].

Метод отдаленной гибридизации. В начале XX в. метод отдаленной гибридизации на практике был воплощен в жизнь И.В. Мичуриным, который сделал его основным методом своей работы. Ученый добавил к нему ряд дополнительных методов – ментора, предварительного сближения и др., на основе которых ученый получил множество новых сортов плодово-ягодных растений для европейской части России [14].

Теоретическое изучение метода отдаленной гибридизации как одного из методов селекции началось в 1920-х гг. во Всероссийском институте растениеводства (ВИР), который тогда возглавлял выдающийся ученый Н.И. Вавилов [15].

Большую роль в развитии теории отдаленной гибридизации сыграл блистательный ученый-генетик Г.Д. Карпеченко, который был первым заведующим лаборатории генетики в ВИР. Ученый впервые в мире получил гибрид от разных родов растений – редьки посевной (*Raphanus sativus* L.) и капусты огородной (*Brassica oleracea* L.) [16].

Кроме того, сотрудниками лаборатории генетики ВИР методами отдаленной гибридизации были получены новые сорта: ранняя яровая пшеница, озимые формы мягкой пшеницы, отдаленные гибриды подсолнечника с земляной грушей, которые не подвержены ржавчине, засухоустойчивый гибрид дикого арбуза колоцинта с культурным его аналогом, а также гибриды плодово-ягодных культур, например гибриды малины и ежевики, которые имеют разное количество хромосом, и т.д. [17].

Однако начавшийся в 1930–1940-е гг. политический террор в отношении генетики и известных ученых-генетиков со стороны власти и представителей так называемой «лысенковщины», который продолжался до середины 1960-х гг., привел к полному уничтожению генетики как науки [18].

В настоящее время отдаленная гибридизация широко используется в селекции плодовых культур. Например, известны труды академика Г.В. Еремина по получению новых сортов плодовых культур на юге России [14].

Кроме того, методы отдаленной гибридизации используются для получения новых сортов растений с использованием гаплоидных технологий, при этом около половины этих технологий приходится на злаковые растения.

Для получения удвоенных гаплоидов (*double haploids* – *DH*) используют три подхода: культуру пыльников, культуру изоли-

рованных микроспор и отдаленную гибридизацию с последующей селективной элиминацией хромосом вида-опылителя [19]. При этом к преимуществам последнего метода относится отсутствие альбиносных культур, а также генетическая стабильность ДН-линий [20].

Например, технологии получения гаплоидных линий для риса были описаны еще в 1982 г. [21]. А к 1986 г. китайские исследователи, используя методы культуры пыльников, получили более ста сортов риса, которые имели разные характеристики по устойчивости к неблагоприятным факторам: холодостойкие, скороспелые, устойчивые к разным болезням, что имеет важность для интродукции полученных сортов риса в различные регионы [22]. В исследованиях ученых из стран Южной и Центральной Америки 1991 г. были получены данные о хорошей устойчивости к холодным условиям, засоленности выведенных ими гаплоидных сортов риса [23]. С другой стороны, в Корее в 1993 г. был выведен новый сорт риса из пыльниковой культуры Joryeongbyeo, который характеризуется раннеспелостью и устойчивостью к проседанию стеблей [24].

Что касается получения гибридов ячменя с помощью ДН-технологий, то оно связывается с так называемым методом *бульбосум* *bulbosum*, суть которого заключается в скрещивании диплоидных или тетраплоидных линий ячменя с диплоидными клонами *Hordeum bulbosum* [25]. Интересно отметить, что еще в 1979 г. канадское правительство дало добро на лицензию на распространение высокоурожайной линии ДН-ячменя Mingo созданной предприятием Ciba-Geigy Limited [26].

Таким образом, сегодня современные методы получения гаплоидных культур масово используются для создания новых сортов риса, пшеницы, ячменя с различными характеристиками, которые можно использовать в том числе и для их интродукции. С другой стороны, учеными отмечается, что существуют ограничения применения этих технологий к сортам мягкой пшеницы, тритикале, связанные с реакцией на пыльники.

Возможное использование методов модификации геномов растений в целях их интродукции. В настоящее время существуют несколько способов мутационной селекции растений:

– индуцированный мутагенез, который является не чем иным, как получением мутаций в организме путем облучения расте-

ний (гамма-лучи, рентгеновские лучи, ионный пучок, ультрафиолетовое облучение, облучение лазером) или химическим путем, когда на наследственность растений воздействуют химическими мутагенами – ЭМС (этилметансульфонат), МНМ (М-метил-Н-нитрозомочевина), ФВ (фтористый водород), ММС (метилметансульфонат) [27];

– селекция биологическими мутагенами – агробактериями (например, *Agrobacterium tumefaciens*) и вирусами (*Tobacco mosaic virus*) [28];

– трансгенез, который получается путем геномного редактирования, которое в свою очередь подразделяется на следующие методы – использование генов ДНК-олигонуклеотидов, использование эндонуклеазов, использование белковых редакторов – ZF- и TALEN-нуклеазов, а также метода CRISPR/Cas, в котором используются короткие РНК [29].

Индукцированный мутагенез

Впервые радиационный мутагенез был получен в Советском Союзе Г.А. Надсоном и Г.С. Филипповым в 1925 г., которые изучили влияние рентгеновых лучей на появление наследственных изменений у низших грибов (*Mucoraceae*) [30; 31, с. 7].

В 1926 г. на Международном генетическом конгрессе в Берлине американский ученый Г.Дж. Мёллер показал на примере дрозофил, что существует возможность получения искусственного мутагенеза в организме при воздействии на него рентгеновскими лучами [32].

Первым ученым, применившим радиационный мутагенез у культурных растений, был американец Льюис Джон Стэдлер, который в 1928 г. получил мутации в кукурузе, пшенице и ячмене при их облучении рентгеновскими лучами и радием [33; 34]. Затем через сравнительно короткое время, в 1934 г., был получен первый сорт культурного растения с искусственным мутагенезом – табак, который имел коммерческий успех [35].

Эти и другие исследования подтолкнули таких советских ученых-генетиков, как Н.Л. Делоне [36], Н.В. Тимофеев-Рессовский [37], А.А. Сапегин [38], к изучению влияния радиации на мутагенез растений, насекомых и грибов. При этом именно работы Н.Л. Делоне и А.А. Сапегина были направлены на изучение возможностей применения искусственного мутагенеза в селекции растений. Известно, что А.А. Сапегин в 1929 г. изучал влияние рентгеновских лучей на продуктивность озимой и яровой

пшеницы [38], Н.Л. Делоне в том же году получил экспериментальные данные мутаций пшеницы при облучении рентгеновскими лучами [36].

Первые эксперименты влияния индуцированного мутагенеза на растения были далеки от практического применения в селекции. Н.И. Вавилов, знакомый с этими исследованиями, говорил о том, что полученные результаты не давали каких-либо надежд на применение полученных индуцированных радиационным методом семян пшеницы в сельском хозяйстве ввиду их низкой продуктивности, для этого, видимо, необходимо выявить оптимальную дозу излучения рентгеновских лучей [39].

В советское время с использованием методов индуцированного мутагенеза было получено множество новых сортов сельскохозяйственных культур, которые отличались такими характеристиками, как устойчивость ко многим болезням, высокая продуктивность в сочетании с устойчивостью к неблагоприятным климатическим условиям, что очень важно для интродукции культурных растений в тех регионах, в которых они ранее не культивировались. Например, широкое применение в сельском хозяйстве Западной Сибири получил сорт яровой мягкой пшеницы Новосибирская-67, который был создан с применением методов радиационного мутагенеза [40, с. 33].

По данным 2024 г. в базе данных о новых мутантных сортах совместного центра Объединенного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства содержится 3433 мутантных сорта [41], из которых на Россию приходится 216 новых мутантных сортов. Таким образом, по селекции на основе мутаций на долю России приходится 6,3 % мировых мутантных сортов культурных растений. По этому показателю Россия находится на четвертом месте после КНР (817), Японии (500) и Индии (345) [42].

В настоящее время в России довольно успешно продолжают работы по созданию новых сортов культурных растений, которые имеют высокие адаптационные характеристики к новым природно-климатическим условиям, что говорит о том, что их можно использовать в целях интродукции.

Например, по данным 2019 г. учеными ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова при облучении семян сои малыми дозами радиации от 40 до 100 Гр, а растений – от 10 до 20 Гр были созданы новые ультра-

скороспелые сорта сои, которые были адаптированы к природно-климатическим условиям Московской области и имеют хорошие показатели продуктивности [43, с. 37].

Не менее интересны полученные в 2024 г. учеными Национального научного центра Республики Крым с помощью радиационного мутагенеза около сорока мутантных форм персика, которые приобрели такие преимущества, как высокая устойчивость к засухе, к морозам, раннеспелость, наличие более крупных плодов и т.д. [44].

Кроме того, следует отметить полученные советскими учеными ряд успешных сортов культурных растений с помощью методов химического мутагенеза, основоположником которых является выдающийся ученый И.А. Рапопорт, который за открытие химического мутагенеза был номинирован на Нобелевскую премию [45].

В настоящее время сотрудниками Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН под руководством Н.С. Эйгес на основе морозоустойчивого сорта пшеницы – пшенично-пырейного гибрида (ППГ) 186, с использованием химических мутагенов была создана целая линейка хемомутантных зимостойких сортов озимой пшеницы. При этом ученые отмечают, что зимостойкость является весьма сложным фактором, который состоит из множества компонентов: устойчивость к отрицательным температурам, устойчивость к задыханию под снегом, толерантность к низкотемпературному фитопатогену, устойчивость к вымоканию, устойчивость к ледяным коркам, устойчивость к выпиранию почвы, которое появляется при оттаивании замерзшей почвы. Таким образом, индуцируемое растение, которое было подвержено химическому мутагенезу в целях повышения зимостойкости, должно иметь не только устойчивость ко всем этим негативным подфакторам климатических условий, но дополнительно иметь комплекс ценных признаков – высокая урожайность и крупность плодов, высокое содержание белка и т.д. Ученые отмечают, что все эти полученные в течение длительного времени новые высокозимостойкие сорта озимой пшеницы (такие, как сорт имени Рапопорта, Белая, Московская 39 стандарт 2) выживали не только в благоприятные и неблагоприятные, но и в особо неблагоприятные зимние периоды [46].

Кроме вышеописанных видов индуцированного мутагенеза значительный интерес представляет метод аэрокосмического (космического) мутагенеза растений [47].

Трансгенезилигеномное редактирование

В 1999 г. были осуществлены первые эксперименты направленного геномного редактирования растений с применением *химерных РНК-ДНК-олигонуклеотидов*, которые помогли исправить гены табака и кукурузы. Данный метод вызвал у этих растений устойчивость к определенным гербицидам [48]. Однако дальнейшие исследования показали, что этот метод не имеет больших перспектив, поскольку мутации, вызванные в растениях, оказались идентичны спонтанным мутациям, то есть мутагенным факторам окружающей среды [49]. Вызывает некоторый интерес метод геномного редактирования, основанный на *использовании эндонуклеаз*, специальных ферментов, с помощью которых добиваются замены участков генома растений [50].

В дальнейшем появились более совершенные методы геномного редактирования на основе белковых редакторов, как метод ZFNs (Zinc-finger nucleases)-нуклеазы, метод TALEN-нуклеазы. Эти подходы основаны на активизации двухцепочных разрывов в интересующих участках ДНК и позволяют рекомбинировать их [51]. ZFNs метод основан на использовании белковых доменов, сцепленных с ионами цинка, которые в свою очередь восприимчивы к определенным триплетам нуклеотидов в цепочке генома и связываются с ним. К недостаткам этого метода можно отнести то, что ZFN дают множественные нецелевые двуцепочечные разрывы ДНК (DSBs), что влияет на значительное увеличение мутаций [52]. Одним из новаторских методов геномного редактирования (ГР) до недавнего времени считался метод на основе химерных нуклеаз TALEN (transcription activator-like effector nucleases), в котором используются эффекторы нуклеаз отдельных бактерий, каждый из которых определяет один нуклеотид. Таким образом, распознавание необходимой цепочки ДНК является более точным по сравнению с методом редактирования ZFN-нуклеаз, и модели ГР, созданные на основе TALEN, более точно приводят к разрыву в ДНК в любом его участке [29]. Однако в последние годы более широкое применение получил метод геномного редактирования на основе CRISPR/Cas, в котором распознавание необходимой цепочки ДНК осуществляется не белками, а короткими РНК [53]. Успешность метода CRISPR/Cas связана с механизмом работы векторной конструкции на его основе по принципу комплементарности, что на порядок повышает точность редактирования, а также универсальностью и простотой метода.

В последние годы в большей части стран, в основном в развитых странах, началось широкое использование мутагенных сельскохозяйственных растений, тем не менее во многих странах не разрешатся или существуют ограничения на создание и выращивание генетически модифицированных организмов (ГМО). Вместе с тем законодательство многих стран, включая и Россию, разрешает ввозить генетически измененные сельскохозяйственные растения и применять их в качестве продуктов питания, кормов для животных и для исследовательских целей [54]. Несмотря на то, что существуют опасения и некоторая предвзятость по отношению к ГМО и использованию его в сельском хозяйстве, научными исследованиями доказана безопасность использования ГМО в пищу. С 1995 г., когда разрешили коммерческое использование ГМО, не зафиксировано негативных последствий для потребителей. ГМО повысили урожайность, устойчивость к вредителям, инфекциям, засухе, холоду, солености в почвах [55]. Необходимо отметить, что

применение генетически модифицированных организмов (ГМО) в агропромышленном комплексе может иметь потенциальные негативные последствия. В частности, существует вероятность горизонтального переноса генов устойчивости к патогенам или химическим веществам от культивируемых растений к диким сородичам через механизмы перекрестной гибридизации [56]. Тем не менее, учитывая безопасность использования генно-модифицированных методов по сравнению с такими методами увеличения урожайности сельскохозяйственной продукции, как использование пестицидов, антибиотиков, эмульгаторов, гормонов роста, и другими методами, использование генной инженерии в агропромышленном комплексе (АПК) имеет многоаспектные выгоды: рост эффективности агропроизводства; рост урожайности агрокультур; снижение болезней агрокультур и потерь от вредителей и неблагоприятных погодных условий; снижение затрат на борьбу с вредителями, в частности на пестициды и т.д. [54].

Таблица 2

Уникальные признаки некоторых сельскохозяйственных растений, полученные в результате инсерционного мутагенеза [28]

Виды растений	Мутаген	Мутагенное значение
Ячмень обыкновенный (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	GR, рентгеновские лучи и этиленмин	Повышает устойчивость к низким температурам, засухе и заморозкам
Рапс (<i>Brassica napus</i> L.) и Капуста полевая (<i>Brassica campestris</i> L.)	ГР	Устойчивость к солености
Чина посевная (<i>Lathyrus sativus</i> L.)	ГР	Повышает устойчивость к засухе и высоким температурам
Арахис гипогейный (<i>Arachis hypogaea</i> L.) и Азиатский культурный рис (<i>Oryza Sativa</i>)	ГР	устойчивость к низким температурам и засухе
Мягкая пшеница (<i>Triticum aestivum</i>)	GR и бета-лучи	Повышает устойчивость к низким температурам, засолению, щелочности и засухе
Ирис (<i>Iris sp.</i>)	ГР	Повышенная устойчивость к низким температурам
Фазеолус обыкновенный (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) Маш или Винья лучистая (<i>Vigna radiata</i> L.) Wil.) и Голубиная крупа (<i>Cajanus cajan</i> Millsp.)	ГМ	Устойчивость к засухе, засолению и дефициту фосфора
Азиатский культурный рис (<i>Oryza Sativa</i>)	ГР	Устойчивость к засолению, засухе и низкому уровню pH
Сетария (<i>Setaria sp.</i>)	GR & FNI	Устойчивость к засухе
Рапс (<i>Brassica napus</i> L.)	GR & EMS	Устойчивость к низким температурам и засухе
Соя культурная (<i>Glycine max.</i>)	Лазер и GR	Устойчивость к засухе
Арабидопсис талианский (<i>Arabidopsis thaliana</i>) и Азиатский культурный рис (<i>Oryza Sativa</i>)	EMS	Устойчивость к солености
Мягкая пшеница (<i>Triticum aestivum</i>)	NEU и EMS	Устойчивость к засухе, низким температурам и засолению
Мягкая пшеница (<i>Triticum aestivum</i>)	EMS	Повышает переносимость соли

Нельзя не отметить, что для сельского хозяйства России интересны исследования геномных исследований, направленные на получение генетически модифицированных сельскохозяйственных растений, которые с успехом переносят как абиотические, так и биотические неблагоприятные условия. По мнению автора статьи, полученные геномным редактированием растения, которые являются стрессоустойчивыми к неблагоприятным абиотическим условиям, можно использовать для целей интродукции в различных климатических условиях России.

В табл. 2 показаны уникальные признаки некоторых сельскохозяйственных растений, полученные в результате инсерционного мутагенеза. Интерес для интродукции в северных широтах вызывают такие мутагенные сельскохозяйственные растения, как ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.), арахис гипогейный (*Arachis hypogaea* L.), азиатский культурный рис (*Oryza Sativa*), мягкая пшеница (*Triticum aestivum*), рапс (*Brassica napus* L.), которые обладают устойчивостью к низким температурам, заморозкам, засухе и т.д. [28].

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время в целях интродукции в той или иной мере используются методы с существенным изменением наследственности растений: метод ступенчатой акклиматизации; методы отдаленной гибридизации. Несмотря на трудоемкость получения новых интродуцированных видов растений, метод ступенчатой акклиматизации используется для весьма ценных видов растений, а также в работах по интродукции дендрофлоры северных регионов. Метод отдаленной гибридизации широко используется в сельском хозяйстве, при этом гаплоидные культуры можно использовать в том числе и для интродукции. Кроме того, автором предлагается включить в методы интродукции, направленные на существенные изменения, еще один пункт: возможное использование методов модификации геномов растений. Устойчивые к абиотическим факторам окружающей среды новые мутагенные сорта культурных растений, полученные в том числе и геномным редактированием, возможно также использовать для их интродукции в различных климатических условиях России.

Список литературы

1. Левинский К.А. Латинско-русский, русско-латинский словарь. М.: АСТ, 2022. 320 с.
2. Шлыков Г.Н. Интродукция и акклиматизация растений: введение в культуру и освоение в новых районах. М.: Сельхозиздат, 1963. 488 с.
3. Понятия, термины, методы и оценка результатов работы по интродукции растений. М.: ГБС АН СССР, 1971. 23 с.
4. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // Syst Rev. 2021. № 10 (1). P. 89. DOI: 10.1186/s13643-021-01626-4.
5. Соколов С.Я. Современное состояние теории интродукции и акклиматизации растений // Интродукция растений и зеленое строительство. 1957. Труды БИН АН СССР. Сер. VI. Вып. 2. С. 9–32.
6. Базиловская Н.А. Теории и методы интродукции растений. М.: Издательство Московского университета, 1964. 131 с.
7. Доброхвалов В.П. Система ступенчатой акклиматизации растений как возможная основа организации акклиматизационной работы в стране // Бюллетень главного ботанического сада. М., 1964. Вып. 55. С. 17–26.
8. Лыпа А.Л. Методологические и методические предпосылки к проведению работ по ступенчатой акклиматизации растений // Бюллетень главного ботанического сада. М., 1965. Вып. 59. С. 3–8.
9. Щепотьев Ф.Л., Рихтер А.А., Павленко Ф.А., Молотков П.И., Кравченко В.И., Ирошников А.И. М.: Агропромиздат, 1985. 224 с.
10. Горохова Г.И. Интродукция винограда амурского в Новосибирске // Бюллетень главного ботанического сада. М., 1984. Вып. 132. С. 41–44.
11. Андропова М.М., Бабич Н.А., Хамитов Р.С. Ступенчатая интродукция древесных растений на севере Русской равнины. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2021. 412 с.
12. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор) // Известия вузов. Лесной журнал. 2021. № 3. С. 73–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85.
13. Залывская О.С., Бабич Н.А. Интродукция арборифлоры в северные широты: монография. Архангельск: САФУ, 2023. 214 с.
14. Еремин Г.В., Еремин В.Г. Использование отдаленной гибридизации в селекции косточковых плодовых культур на юге России // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2021. № 91. С. 110–120. DOI: 10.21515/1999-1703-91-110-120.
15. Инге-Вечтомов С.Г. Н.И. Вавилов, ВИР, Университет... // Экологическая генетика. 2020. № 18 (1). С. 5–10. DOI: 10.17816/ecogen19140.
16. Захаров И.К. Влияние ВИР на становление и развитие научных направлений по генетике и селекции растений в Институте цитологии и генетики Сибирского отделения АН СССР/ РАН и vice versa // Историко-биологические исследования. 2020. Т. 12, № 3. С. 46–65. DOI: 10.24411/2076-8176-2020-13004.
17. Вишнякова М.А., Гончаров Н.П. Институционализация генетики и отдаленной гибридизации растений в 1920–1930 годах во Всесоюзном институте растениеводства // Генетика. 2019. Т. 55, № 11. С. 1241–1252. DOI: 10.1134/S001667581911016X.
18. Филин В.Р., Кожевникова А.Д. Воспоминания С.Ю. Липшица о Николае Ивановиче Вавилове и гербарии Московского государственного университета // Историко-биологические исследования. 2023. Т. 15, № 1. С. 129–148. DOI: 10.24412/2076-8176-2023-1-129-148.
19. Дьячук Т.И., Акинина В.Н., Хомякова О.В., Калашникова Э.В. Отдаленная гибридизация как метод получения гаплоидных растений у злаков (обзор проблемы) // Биотехнология и селекция растений. 2019. № 2 (2). С. 44–52. DOI: 10.30901/2658-6266-2019-2-44-52.
20. Калинин Н.В., Донцова В.Ю., Чертова Н.Г., Марченко Д.М. Создание гаплоидных растений озимой пшеницы на основе метода отдаленной гибридизации с кукурузой

зой // *Зерновое хозяйство России*. 2024. № 16 (6). С. 74–80. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-95-6-74-80.

21. S. Samantary J., Ali K.L.C., Nicolas J.L., Katara R.L., Verma C., Parameswaran B.N., Devanna A., Kumar B., Dash S.S. Bhuyan. Doubled Haploids in Rice Improvement: Approaches, Applications, and Future Prospects // In: J. Ali, Sh.H.Wani (ed) *Rice Improvement, Physiological, Molecular Breeding and Genetic Perspectives*. 2021. P. 425–447. DOI: 10.1007/978-3-030-66530-2_12.

22. Loo S-W., Xu Z-H. Anther culture for rice improvement in China // In: Y.P.S. Bajaj (ed.), *Biotechnology in agriculture and forestry: Rice*. Springer-Verlag, Berlin. 1990. P. 151–179. DOI: 10.1007/978-3-642-83986-3_12.

23. Zapata F.J., Alejar M.S., Torrizo B., Novero A.U., Singh V.P., Senadhira D. Field performance of anther-culture-derived lines from F1 crosses of Indica rices under saline and non-saline conditions // *Theoretical and Applied Genetics*. 1991. № 83. P. 6–11. DOI: 10.1007/BF00229219.

24. Islam M.I., Arif M.R., Hasan Md.T., Robin A.H.K. Anther Culture in Crop Plants: Progress and Perspectives // *Plant Biotechnology and Breeding*. 2023. № 11. P. 69–96. DOI: 10.9787/PBB.2023.11.2.69.

25. Pendinen G.I., Scholz M. Homoeologous chromosome pairing at metaphase I of meiosis in *Hordeum vulgare* L. × *H. bulbosum* L. triploid hybrids (HvHbHb). // *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020. № 3 (2). P. 6–15. DOI: 10.30901/2658-6266-2020-2-02.

26. Dwivedi S.L., Britt A.B., Tripathi L., Sharma S., Upadhyaya H.D., Ortiz R. Haploids: Constraints and opportunities in plant breeding // *Biotechnology Advances*. 2015. № 33 (6). P. 812–829. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2015.07.001.

27. Chaudhary J., Deshmukh R., Sonah H. Mutagenesis Approaches and Their Role in Crop Improvement // *Plants (Basel)*. 2019. № 8 (11). P. 467. DOI: 10.3390/plants8110467.

28. Antwi-Boasiako A., Adu-Antwi P., Amoah R.A., Boateng A.B., Gyau J., Frimpong M., Boakye-Mensah I., Ahiamadia I.O. Mutagenesis Application in Plant Improvement: Advancements and Its Future // Open access peer-reviewed chapter. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.112510.

29. Щербань А.Б. Модификация геномов растений: от индуцированного мутагенеза до геномного редактирования // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022. № 26 (7). С. 684–696. DOI: 10.18699/VJGB-22-83.

30. Курсанова Т.А. Основоположник отечественной микробиологии. К 150-летию со дня рождения академика Г.А. Надсона // *Вестник Российской академии наук*. 2017. Т. 87, № 7. С. 663–669. DOI: 10.7868/S086958731707009X.

31. Мосез И.Б. Лекции по радиационной генетике. Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2005. 208 с.

32. Курсанова Т.А. Между биохимией, физикой и политикой. Особенности молекулярной биологии в СССР (30–60-е гг.) // *Историко-биологические исследования*. 2021. Т. 13, № 3. С. 94–116. DOI: 10.24412/2076-8176-2021-3-94-116.

33. Stadler L.J. Genetic effects of x-rays in maize // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1928. № 14. P. 69–75. DOI: 10.1073/pnas.14.1.69.

34. Stadler L.J. Mutations in Barley induced by x-rays and radium // *Science*. 1928. № 68. P. 186–7. DOI: 10.1126/science.68.1756.186.

35. Acquah G. Principles of Plant Genetics and Breeding. John Wiley & Sons; Hoboken, N.J, USA: 2009. 740 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://archive.org/details/PrinciplesOfPlantGeneticsAndBreeding/page/n3/mode/2up> (дата обращения: 16.02.2025).

36. Делоне Л.Н. Опыты по рентгенизации культурных растений. Пшеница // *Труды института селекции*. 1928. № 4. С. 3–16.

37. Timofeeff-Ressovsky N.W. Auslösung von Vitalitätsmutationen durch Röntgenbestrahlung bei Drosophila melanogaster // *Strahlentherapie*. 1934. № 51. P. 658–663.

38. Сапегин А.А. Рентгеномутации как источник новых сортов сельскохозяйственных растений // *Природа*. 1934. № 9. С. 28–34.

39. Баутин В.М. Научный вклад выдающегося ученого академика Н.И. Вавилова в развитие российского и мирового сельского хозяйства // *Известия ТСХА*. 2018. Вып.1. С. 147–160. DOI: 10.26897/0021-342X-2018-1-147-160.

40. Новохатин В.В., Драгавцев В.А. Научное обоснование эколого-генетической селекции мягкой яровой пшеницы // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34, № 12. С. 39–46. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11206.

41. The FAO/IAEA mutant variety database // *Plant Breeding & Genetics Newsletter*. 2024. № 52. 20 p.; URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Newsletters/pbg-52.pdf> (дата обращения: 12.02.2025).

42. Mutant Variety Database. [Электронный ресурс]. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Home.aspx> (дата обращения: 10.02.2025).

43. Шевченко В.А., Дорохов А.С., Бельшикина М.Е., Кобозева Т.П., Загоруйко М.Г., Попова Н.П., Синеговский М.О., Гуреева Е.В., Башмаков И.А., Дегтарева Е.Д. Технологии и технические средства в соеводстве Нечерноземья: монография. М.: ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2024. 140 с. DOI: 10.37738/VNIIGIM.2024.43.78.001.

44. Смыков А.В. Радиационный мутагенез и изменчивость персика // *Бюллетень ГНБС*. 2019. Вып. 132. С. 60–67. DOI: 10.25684/NBG.boolt.132.2019.07.

45. Эйгес Н.С., Волченко Г.А., Волченко С.Г., Духанов Ю.А., Кузнецова Н.Л., Упелник В.П. Пшеница в средней полосе России. Некоторые аспекты ее становления. К 70-летию открытия метода химического мутагенеза И.А. Рапопортом III. Свойства, сопутствующие высокой выносливости к неблагоприятным условиям внешней среды у озимой пшеницы // *История и педагогика естествознания*. 2018. № 3. С. 35–44. DOI: 10.24411/2226-2296-2018-10306.

46. Вайсфельд Л.И., Боме Н.А. Теоретические аспекты химических мутагенов и фенотипических активаторов роста растений, разработанные И.А. Рапопортом (обзор литературных источников) // *Биосфера*. 2022. № 3 (22). С. 245–253. DOI: 10.24855/biosfera.v14i3.689.

47. Jiang L., Zhang B., Chen W., Qiu T., Wang L., Yang Sh. Space breeding in modern agriculture // *American Journal of Agricultural Research*. 2020. № 5. P. 81. DOI: 10.28933/ajar-202-01-1005.

48. Beetham P.R., Kipp P.B., Sawycky X.L., Arntzen C.J., May G.D. A tool for functional plant genomics: chimeric RNA/DNA oligonucleotides cause in vivo gene-specific mutations // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1996. № 96 (15). P. 8774–8778. DOI: 10.1073/pnas.96.15.8774.

49. Ruiter R., Van Den Brande I., Stals E., Delaure S., Cornelissen M., D'Halluin K. Spontaneous mutation frequency in plants obscures the effect of chimera-plasty // *Plant Molecular Biology*. 2003. № 53 (5). P. 715–729. DOI: 10.1023/B:PLAN.0000019111.96107.01.

50. Watanabe K., Breier U., Hensel G., Kumlhehn J., Schubert I., Reiss B. Stable gene replacement in barley by targeted double-strand break induction // *Journal of Experimental Botany*. 2015. № 67 (5). P. 1433–1445. DOI: 10.1093/jxb/erv537.

51. Mosbach V., Poggi L., Viterbo D., Charpentier M., Richard G.F. TALEN-induced double-strand break repair of CTG trinucleotide repeats // *Cell Reports*. 2018. № 22 (8). P. 2146–2159. DOI: 10.1016/j.celrep.2018.01.083.

52. Abdel-Hamid A.A., Galal O.A., Elmoghazy A., Abd Elrazek M.M. Using gamma rays for genetic improvement of Rice resistance to blast disease // *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*. 2022. № 13 (10). P. 85–89. DOI: 10.21608/jacb.2022.152986.1028.

53. Hunter CT. (2021) CRISPR/Cas9 targeted mutagenesis for functional genetics in maize // *Plants*. 2021. № 10 (4). P. 723. DOI: 10.3390/plants10040723.

54. Дудин М.Н. Трансгенные организмы (ГМО) в сельском хозяйстве: объективная необходимость в целях обеспечения глобальной продовольственной безопасности или способ увеличения прибыли ТНК АПК? // *Продовольственная политика и безопасность*. 2020. № 7 (2). С. 107–120. DOI: 10.18334/ppib.7.2.100666.

55. Goodman R.E. Twenty-eight years of GM Food and feed without harm: why not accept them? // *GM Crops Food*. 2024. № 15 (1). P. 40–50. DOI: 10.1080/21645698.2024.2305944.

56. Schütte G., Eckerstorfer M., Rastelli V., Reichenbecher W., Restrepo-Vassalli S., Ruohonen-Lehto M., Saucy A.-G.W., Mertens M. Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants // *Environmental Sciences Europe*. 2017. № 29 (1). P. 5. DOI: 10.1186/s12302-016-0100-y.