

КУРИНА
Анастасия Борисовна

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СЕЛЕКЦИОННАЯ ЦЕННОСТЬ
РЕДИСА И РЕДЬКИ (*RAPHANUS SATIVUS* L.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ
ВЫРАЩИВАНИЯ**

06.01.05 – Селекция и семеноводство сельскохозяйственных растений

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Санкт-Петербург – 2022

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР)

**Научный
руководитель:**

Артемьева Анна Майевна

кандидат сельскохозяйственных наук,
ведущий научный сотрудник отдела генетических ресурсов
овощных и бахчевых культур Всероссийского института
генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова
(ВИР), г. Санкт-Петербург

**Официальные
оппоненты:**

Балашова Ирина Тимофеевна

доктор биологических наук,
главный научный сотрудник лаборатории новых технологий
Федерального государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный научный центр овощеводства»
(ФГБНУ ФНЦО), г. Москва

Осипова Галина Степановна

доктор сельскохозяйственных наук,
профессор кафедры плодоовощеводства и декоративного
садоводства Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования Санкт-
Петербургского государственного аграрного университета,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Российский
государственный аграрный университет - МСХА имени К.
А. Тимирязева».

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 года в __ часов на заседании диссертационного совета Д 006.041.02. при Всероссийском институте генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова по адресу: 190031, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова и на сайте института:
<https://www.vir.nw.ru/dissertatsionnyj-sovet/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

Елена Вячеславовна Рогозина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы. Редис и редька (*Raphanus sativus* L.) – экономически важные корнеплодные культуры, принадлежащие к семейству *Brassicaceae*. Они являются неотъемлемой составляющей рационального питания человека. Корнеплоды содержат химические вещества, которые важны для здоровья человека, такие как фенолы, витамины, минералы и глюкозинолаты (Gutiérrez et al., 2004; Ramirez et al., 2020).

На 2021 год в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию на территории РФ, включено 268 образцов редиса, из которых сортов 81% и гибридов 19% и 97 образцов редьки (87 и 13% сортов и гибридов соответственно), из них дайкона – 38 (73,7 и 26,3%), редьки китайской (лоба) – 27 (92,6 и 7,4%), редьки европейской – 32 (96,9 и 3,1%). Все разнообразие редиса в Госсортреестре представлено преимущественно красными овально-округлыми (65,7%), розово-красными с белым кончиком овальными (10,2%) и цилиндрическими (9,7%) сортами. Сортовое разнообразие редьки представлено более широко – практически всеми ботаническими разновидностями, но малым количеством сортов каждого сортотипа.

Выращиванием редиса и редьки в России занимаются садоводы-любители, небольшие частные хозяйства и в незначительной степени крупные сельскохозяйственные предприятия. Они нуждаются в экономически выгодных отечественных сортах и гибридах: разнообразных по фенологическим, морфологическим, биохимическим, иммунологическим, хозяйственным признакам, высокотоварных, пригодных для современных механизированных технологий, в том числе в защищенном грунте и в высокотехнологичных условиях выращивания, переработки и хранения. Районированные сорта и гибриды не в полной мере соответствуют этим требованиям, несмотря на достаточно большое число их в Госреестре РФ.

Для решения данных задач необходимо планомерное широкое изучение исторического и современного генофонда *R. sativus* и создание нового исходного материала для селекции (Бохан, 2014, 2015; Федорова и др., 2017). Следует также отметить, что вопросы оценки исходного материала и выявления источников хозяйственно-ценных признаков для селекции растений *R. sativus* разработаны недостаточно. Неполно изучена физиологическая реакция образцов различных сортотипов на условия выращивания, биохимические особенности, пределы изменчивости признаков селекционного интереса, экологическая пластичность, адаптационные возможности, устойчивость к абиотическим и биотическим стрессам.

Материал для таких исследований предоставляет мировая коллекция *R. sativus* Российской Федерации, хранящаяся в ВИР. В настоящее время коллекция насчитывает 2639 образцов, поступивших из 75 стран мира, из них в постоянном каталоге коллекции ВИР находится 1506 образцов: редиса – 930 образцов, редьки – 576. Ежегодно коллекция пополняется многочисленными образцами новейшей селекции, прежде всего из Китая, Японии, Нидерландов, России, а также образцами, собранными в ходе экспедиционных сборов в Средней Азии и Закавказье. Новые образцы имеют различный статус: местные популяции, селекционные сорта, линии и гибриды F₁.

Исходя из выше сказанного, изучение и оценка разнообразия растений *R. sativus* крупнейшей мировой коллекции ВИР является актуальными.

Цель исследования: изучить мировое разнообразие редиса и редьки *Raphanus sativus* L. коллекции ВИР и исследовать изменчивость фенологических, морфологических, биохимических, физиологических признаков растений в связи с особенностями их происхождения и условиями среды.

Задачи:

1. Изучить морфологические, фенологические и хозяйственно ценные признаки мировой коллекции редиса и редьки при различных условиях выращивания в открытом и защищенном грунте;
2. Исследовать особенности формирования урожая и параметры экологической пластичности и адаптивности *R. sativus*;
3. Провести комплексный биохимический анализ корнеплодов и листовой массы разнообразия редиса и редьки;
4. Определить закономерности изменчивости и корреляционных связей комплекса количественных признаков редиса и редьки;
5. Провести лабораторную экспресс-диагностику алюмоустойчивости коллекции и установить амплитуду стрессоустойчивости различных групп сортов;
6. Выделить перспективный исходный материал для селекции редиса и редьки по хозяйственно-ценным признакам для различных условий выращивания; создать универсальный ультраскороспелый сорт редиса.

Научная новизна.

Впервые проведено широкое комплексное изучение фенологических, морфологических, биохимических, физиологических и хозяйственно ценных признаков репрезентативного генетического разнообразия культур *Raphanus sativus* коллекции ВИР в различных условиях выращивания Ленинградской области и дано научное обоснование особенностей роста и развития растений редиса и редьки в зависимости от агроклиматических параметров среды. Впервые определены характеристики (экологической) адаптивности различных по ботанической и агробиологической принадлежности образцов редиса и редьки в условиях данного региона. Установлены относительно стабильные и высоко варьирующие количественные признаки *R. sativus*. Получены обширные новые данные о химическом составе корнеплодов и листьев сортотипов редиса и редьки, с помощью метаболомного профилирования впервые у культур вида идентифицирован широкий спектр вторичных метаболитов (до 140), важных с точки зрения функционального питания человека. Разработана модификация метода экспресс-оценки алюмоустойчивости *R. sativus*. Впервые изучены образцы редиса и редьки по признаку алюмотолерантности, идентифицированы контрастные образцы по устойчивости к алюминию.

Теоретическая и практическая значимость.

Определены закономерности фенотипической изменчивости всех разновидностей и большинства сортотипов культур *Raphanus sativus* в контрастных условиях выращивания, установлены пределы варьирования морфологических, фенологических и биохимических признаков селекционного интереса для каждой группы сортов. Среди установленных вторичных метаболитов определены органические кислоты, свободные аминокислоты, свободные жирные кислоты, многоатомные спирты, фенолсодержащие соединения, алканы. Модифицирован метод экспресс-оценки алюмоустойчивости для массового скрининга коллекционного и селекционного материала *R. sativus*, выделены образцы – возможные носители ценных аллелей генов.

Выделены источники ценных признаков культур *R. sativus* для селекции на скороспелость, продуктивность, высокое качество корнеплода и устойчивость к раннему стеблеванию и для непосредственного использования в овощеводстве: образцы редиса для выращивания в открытом грунте, зимней и весенней теплицах Ленинградской области, а также в условиях интенсивной светокультуры; редьки – для выращивания при

двух сроках посева, в том числе при весеннем посеве в провоцирующих стеблевании условиях длинного дня. Создан ультраскороспелый сорт редиса Викуся.

Материал, методология и методы исследования. Детальное описание использованного коллекционного материала, оценки фенологических, морфологических и хозяйственно ценных признаков, методы биохимического и физиологического анализа, статистическая обработка данных приводится в Главе 2 диссертации и автореферата.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Комплексная оценка мирового генофонда *R. sativus* различного ботанического, агроэкологического и географического происхождения по фенотипическим, биохимическим признакам и устойчивости к абиотическим стрессорам позволила определить закономерности изменчивости и сопряженности признаков и выделить источники хозяйственно ценных признаков для селекции в различных условиях выращивания Ленинградской области.

- Детальный биохимический, в том числе метаболомный, анализ позволил выделить разновидности, сортотипы и образцы редиса и редьки для функционального питания человека.

- Модифицированный метод экспресс-диагностики исходного материала редиса и редьки на устойчивость к алюминию.

Апробация результатов работы.

Результаты исследований по диссертации были представлены на: Международной научно-практической конференции «Научное обеспечение развития с.-х. и снижение технологических рисков в продовольственной сфере» (26-28 января, 2017, СПбГАУ, СПб); Международной научно-практической конференции «Методология селекции и семеноводства овощных корнеплодных растений» (23-24 августа, 2017, ВНИИССОК, Москва); Международной научной конференции, посвященной 85-летию Агрофизического НИИ «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего» (27-29 сентября, 2017, АФИ, СПб); Международной научно-практической конференции «Наука и образование как основа устойчивого развития агропромышленного комплекса» (25-28 января 2018 СПбГАУ, СПб); Молодежной конференции «Ломоносов 2018» (9-13 апреля, 2018, Москва, МГУ); IV (XII) Международной ботанической конференции молодых учёных (22-28 апреля, 2018, БИН РАН, СПб); X Международном Симпозиуме «Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты» (14-19 мая 2018 г., Москва, Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева); Brassica 2018, 21st Crucifer Genetics Conference (July 1-4, Saint-Malo, France); Международной конференции «Состояние и перспективы селекционных исследований культур семейства Brassicaceae в современных условиях» (9-12 сентября 2019 г. Санкт-Петербург, ВИР); Международной конференции «125 лет прикладной ботаники в России» (Санкт-Петербург, 25–28 ноября 2019 г, ВИР).

Личный вклад автора. Постановка проблемы, целей и задач исследований, экспериментальные работы, обработка, анализ и обобщение полученных результатов на 90% выполнены автором.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 19 печатных работ, их них 7 – в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 3 каталога ВИР. Получен патент РФ на сорт № 11305. Сорт редиса Викуся /Курина А.Б., Корнюхин Д.Л., Хмелинская Т.В. Выдан по заявке № 77608 датой приоритета 27.10.2020.

Структура и объем диссертации.

Диссертация изложена на 238 страницах компьютерного текста, содержит 42 таблицы и 30 рисунков. Состоит из введения, обзора литературы, материалов и методов, экспериментальной части, заключения, рекомендаций для производства и селекционной практики, списка использованной литературы и 16 приложений. Список литературы содержит 342 источника, из них – 150 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В обзоре литературы приведены сведения о народнохозяйственном значении, происхождении культурных форм *Raphanus*, биологические, морфологические особенности и биохимический состав, рост и развитие растений *R. sativus*, отношение к условиям окружающей среды. Освещены история развития, современное состояние производства редиса и редьки, современный исходный материал для селекции и основные направления селекции.

Глава 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Место и условия проведения исследований. Научно-исследовательская работа была выполнена в ФГБНУ ФИЦ ВИГРР им. Н.И. Вавилова (ВИР) на НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (г. Пушкин, Ленинградская область) в 2016-2018 годах и в ФГБНУ «Агрофизический НИИ» (г. Санкт-Петербург) в 2017-2018 годах.

2.2 Материал и методика исследований. Материалом исследований послужила коллекция редиса и редьки ВИР различного эколого-географического происхождения, отражающая разнообразие вида: коллекция редиса представлена 115 образцами из 37 стран, принадлежащих 14 сортотипам 6 разновидностям европейского и китайского подвидов; коллекция редьки представлена 83 образцами из 21 страны, принадлежащих 10 сортотипам 8 разновидностям европейского, китайского и японского подвидов.

Коллекцию редиса изучали при четырех условиях выращивания: 1) зимняя остекленная теплица: посев в середине декабря, площадь делянок 0,3 м²; 2) весенняя поликарбонатная теплица: посев в конце апреля, площадь делянок 1 м²; 3) открытый грунт: посев в середине мая, площадь делянок 1 м²; 4) интенсивная светокультура (91 образец): посевы с ноября по апрель, площадь делянок 0,2 м². Схема посева во всех вариантах 10×5 см. Повторность опыта двукратная, расположение рендомизированное.

Коллекцию редьки изучали при двух сроках посева: весеннем и летнем. Посев при весеннем сроке – в конце мая. В 2016 году изучено 68 образцов редьки летней европейской, китайской и японской, образцы зимней европейской редьки при весеннем сроке посева не изучали. В последующие годы изучали лишь образцы, формирующие корнеплод при данном сроке посева (23 образца). Летний посев осуществляли в середине июля. Изучено 80 образцов зимней европейской, китайской и японской редьки, образцы летней европейской разновидности не изучали. Площадь делянок 1,4 м², схема посева 70×15 см, повторность двукратная, расположение рендомизированное.

При анализе материала в течение вегетационного периода проводили фенологические наблюдения, биометрические измерения и морфологическое описание растений.

2.3 Биохимическая оценка. Биохимический анализ проводили в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР в фазе технической спелости корнеплодов. Анализ и обработку материала осуществляли по методике отдела биохимии ВИР (Ермаков и др., 1987): содержание массы сухого вещества определяли взвешиванием до и после

высушивания средней пробы в термостате FED 400 Binder (Германия) при 105°C; сахаров – методом Бертрана; аскорбиновой кислоты – методом прямого извлечения из растений 1% соляной кислотой, с последующим титрованием с помощью 2,6-дихлориндофинола (реактив Тильманса); состав сахаров, свободных аминокислот, органических кислот, фенолкарбоновых кислот – газо-жидкостной хроматографией с масс-спектрометрией.

2.4 Оценка алюмоустойчивости. Исследования проводили в отделе физиологии ВИР. За основу взят метод оценки алюмоустойчивости зерновых культур с использованием эриохромцианинового красителя (Aniol, 1991). На основании предварительных экспериментов мы использовали концентрации $AlCl_3 \times 6H_2O$ 66, 83 и 99 мМ. Устойчивость растений к алюминию определяли по длине отрастания кончика корня.

2.5 Статистический анализ. Тестирование данных на нормальность распределения выполняли с помощью критерия Шапиро-Уилка и графика квантиль-квантиль (QQ Plot). Средние значения данных с нормальным распределением сравнивали с помощью дисперсионного анализа (ANOVA, MANOVA), корреляционный анализ – с использованием коэффициента Пирсона. Данные с распределением отличным от нормального сравнивали с использованием критерия Краскела-Уоллиса. Для выявления влияния генотипа и условий среды на признаки использовали однофакторный и многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA, MANOVA). Для выявления выделившихся образцов использовали критерий Тьюки (HSD) и HCP₀₅ (StatSoft, 2013, Наследов, 2012). Оценку адаптивной способности и стабильности генотипов проводили по методике А.В. Кильчевского и Л.В. Хотылевой (1989), расчет экологической пластичности и стабильности по методике S.A. Eberhart and W.A. Russell (1966) в изложении В.А. Зыкина (2005), показатель гомеостатичности рассчитан по формуле В.В. Хангильдина (1978). Кластерный анализ проводили методом Уорда в программе PAST (Hammer et al., 2001).

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Фенологические и морфологические особенности редиса и редьки

Вегетативный период *R. sativus*

Установлена изменчивость продолжительности вегетативного периода у репрезентативной выборки коллекции редиса и редьки, которая составила для редиса 21,9-39,1 дней ($CV=16,4\%$), для редьки – 33,8-87,0 дней ($CV=28,7\%$) в среднем для всех условий выращивания, что в целом согласуется с литературными данными. По данному признаку коллекция редиса разделена на пять достоверно различных групп: ультраскороспелые (20-23 дня), скороспелые (23-26 дней), среднеспелые (26-29 дней), позднеспелые (29-32 дня), очень позднеспелые (более 32 дней); редьки – на четыре группы: скороспелые (30-40 дней), среднеранние (40-50 дней), среднеспелые (50-65 дней), позднеспелые (75-90 дней) (рис. 1).

В целом коллекция редиса во всех условиях выращивания характеризовалась высокой изменчивостью продолжительности вегетативного периода ($CV=23,4\%$). Прослеживалась тенденция к сокращению продолжительности вегетативного периода при выращивании в условиях интенсивной светокультуры и, наоборот, увеличение в зимней теплице. Резкое увеличение продолжительности вегетативного периода при выращивании в зимней теплице связано с низкой освещенностью ($r=-0,64$; $p \leq 0,05$).

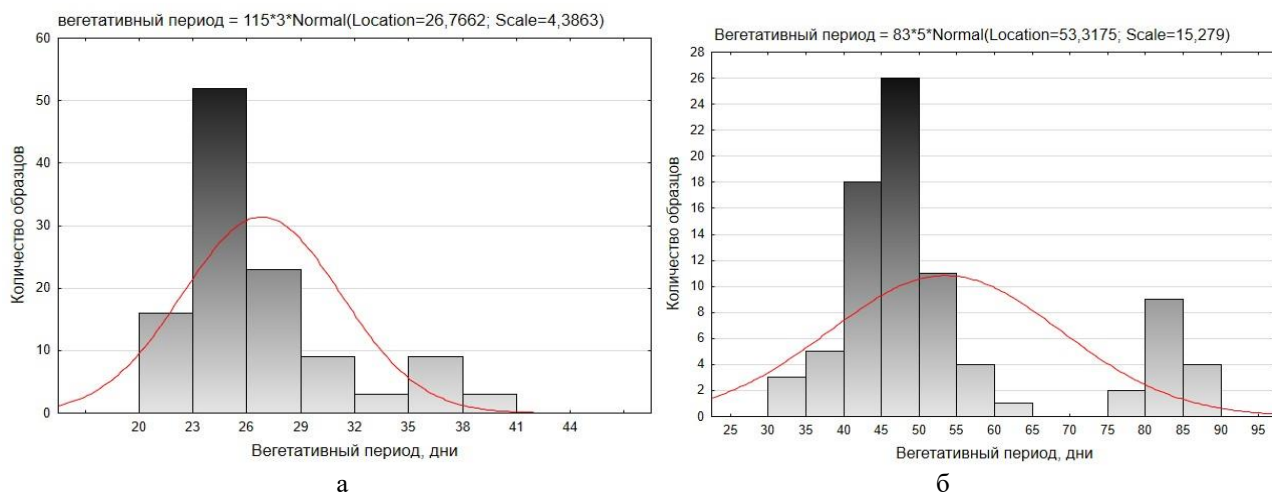


Рис. 1 Гистограмма распределения образцов редиса (а) и редьки (б) по продолжительности вегетативного периода

Изменчивость вегетативного периода 20 образцов редьки, выращенных при двух сроках посева, низкая – $CV=9,8\%$, при этом в 2017 году наблюдалось сокращение продолжительности вегетативного периода при обоих сроках посева. Продолжительность вегетативного периода редьки заметно сокращалась при весеннем сроке посева, что объясняется ускоренным развитием растений из-за увеличивающейся длины дня и пониженной температуры в этот период. Выявлена положительная корреляционная связь продолжительности вегетативного периода с сумой активных температур ($r=0,66$, $p\leq 0,05$) и отрицательная с продолжительностью светового дня ($r=-0,62$, $p\leq 0,05$).

Вариабельность вегетативного периода 80 образцов редьки, выращенных только при летнем посеве, увеличивалась ($CV=27,4\%$) за счет наличия позднеспелых форм. При этом отмечено сокращение продолжительности вегетативного периода в 2018 году у образцов китайского (subsp. *sinensis*) и европейского подвида (subsp. *sativus*) и незначительное увеличение у образцов японского подвида (subsp. *acantiformis*).

Фотопериодическая реакция *R. sativus*

На фоне различий гидротермических показателей вегетативных периодов и нарастающего светового дня нами была проведена оценка образцов *R. sativus* и выделены группы по устойчивости растений к преждевременному стеблеванию с использованием бальной шкалы (Горовая, 2008) при выращивании в условиях нарастающего светового дня в светокультуре, весенней теплице (редис) и открытом грунте (редис, редька) (табл. 1).

Большинство изученных образцов редиса характеризовались устойчивостью к преждевременному стеблеванию на уровне 2-4 баллов в весенней теплице и открытом грунте. Незначительное количество растений, перешедших в фазу стеблевания (2 балла), было характерно в основном для округлых разновидностей европейского подвида. Уже для форм с удлиненной формой корнеплода процент стеблевания мог достигать до 50% (3-4 балла). Отмечено, что европейские формы редиса округлых разновидностей и образцы китайского подвида малочувствительны/нейтральны к изменению длины дня. Практически непригодными для выращивания в условиях нарастающего светового дня оказались образцы сортотипов Белый длинный и Красный длинный.

Таблица 1. Распределение образцов редиса и редьки по устойчивости к стеблеванию в различных условиях выращивания (2016-2018 гг.)

Балл	Количество образцов, шт/%				
	Редис			Редька	
	Весенняя теплица	Открытый грунт	Светокультура	Весенний посев	Летний посев
1	14/12,2	12/10,4	34/37,8	1/1,5	48/60,0
2	40/34,8	25/21,7	13/14,4	2/2,9	14/17,5
3	29/25,2	30/26,1	18/20,0	6/8,8	13/16,3
4	23/20,0	34/29,6	18/20,0	4/5,9	4/5,0
5	8/6,9	10/8,7	3/3,3	8/11,8	1/1,2
6	1/0,9	4/3,5	4/4,5	47/69,1	0/0,0

В условиях нарастающего светового дня и кратковременного воздействия пониженных температур в ночное время при весеннем посеве в первую очередь перешли в фазу стеблевания образцы редьки китайского и японского подвида, несколько позднее – летние европейские. При летнем посеве количество образцов редьки, перешедших в фазу стеблевания, заметно сократилось в связи с сокращением продолжительности светового дня до 15 часов. Но у 33,8% образцов китайского и японского подвида отмечалось преждевременное стебление в пределах 5-20% и у 6,3% – более 20%.

Выявлено, что наиболее чувствительные к фотопериоду во всех условиях выращивания образцы редиса находились среди сортоотипов Красный длинный и Белый круглый, образцы сортоотипа Белый длинный – в условиях открытого грунта и весенней теплицы, сортоотипа Розово-красный с белым кончиком округлый – в условиях открытого грунта и светокультуры. Образцы редьки, наиболее чувствительные к фотопериоду, относились к азиатским подвидам – лобы белой и розово-красной разновидности и дайконы осенне-зимней группы разновидностей типа Сакураджима и Шогоин. Нейтральные к фотопериоду образцы редиса относились к сортоотипам Розово-красный с белым кончиком цилиндрический, Красный овально-округлый и Розово-красный овальный, а также к китайскому подвиду, образцы редьки – к европейскому подвиду зимним и летним разновидностям и азиатским подвидам – лобы зеленой разновидности и дайконы типа Камейдо и Сироагири.

Морфологические особенности листового аппарата и корнеплода *R. sativus* и их изменчивость

Изучение коллекции редиса и редьки по морфологическим параметрам листового аппарата и корнеплода и признакам продуктивности позволило выявить статистические параметры количественных признаков культур вида, разновидностей и сортоотипов (табл. 2, 3).

У редиса средней изменчивостью характеризовались высота и диаметр розетки, длина и ширина листа. Прослеживались тенденции: к увеличению высоты розетки в весенней теплице и уменьшению в зимней; увеличению диаметра розетки в открытом грунте и уменьшению в условиях интенсивной светокультуры; увеличению длины и ширины листа в зимней теплице и снижению в весенней. Среди признаков корнеплода средней изменчивостью характеризовался диаметр корнеплода, остальные признаки имели высокий коэффициент вариации. Степень варьирования длины и массы корнеплода увеличивалась в условиях весенней теплицы, диаметра корнеплода – в зимней теплице, массы растения – в светокультуре. Отмечено увеличение средней массы растения и корнеплода в открытом грунте.

Таблица 2. Характеристика сортотипов редиса по морфологическим признакам и продуктивности, среднее за 2016-2018 гг.

Сортотип	Высота розетки, см	Диаметр розетки, см	Длина листа, см	Ширина листа, см	Длина корнел., см	Диаметр корнел., см	Индекс корнел.	Масса растения, г	Масса корнел., г
Красный овально-округлый (44 обр.)	18,7±2,6 ^b 14,4-24,6 13,7%	15,0±1,7 ^b 11,8-18,5 11,4%	10,6±1,2 ^b 8,5-13,1 11,4%	6,8±0,9 ^b 5,2-9,1 13,7%	3,3±0,3 ^b 2,8-4,5 10,3%	2,8±0,2 ^{bd} 2,4-3,2 7,4%	1,2±0,1 ^b 1,0-1,6 11,2%	30,4±7,2 ^{ab} 16,8-45,9 23,5%	16,7±3,3 ^{ab} 9,9-24,8 19,6%
Розово-красный овальный (5 обр.)	17,9±2,4 ^{bcg} 16,0-21,5 13,6%	14,3±1,5 ^{cg} 12,9-16,7 10,2%	9,9±1,5 ^{ch} 8,8-11,6 14,7%	6,3±1,2 ^{ch} 5,4-8,0 19,3%	3,5±0,5 ^b 3,0-4,2 13,2%	2,6±0,3 ^c 2,2-2,9 10,4%	1,4±0,3 ^c 1,2-1,9 21,6%	26,8±7,4 ^c 20,1-37,9 27,5%	14,0±2,9 ^c 10,5-17,6 21,0%
Темно-красный округлый (4 обр.)	17,8±0,6 ^{bc} 17,0-18,3 3,3%	14,7±0,7 ^{bc} 14,0-15,5 5,0%	10,1±0,5 ^{bc} 9,6-10,9 5,3%	6,9±0,8 ^{bc} 6,3-8,1 12,2%	3,4±0,5 ^b 2,8-4,0 14,3%	2,6±0,2 ^c 2,3-2,9 9,0%	1,4±0,2 ^{bc} 1,2-1,7 14,7%	29,7±3,7 ^{abc} 26,8-34,9 12,6%	15,9±1,8 ^{abc} 13,9-17,6 11,4%
Красный длинный (5 обр.)	26,7±1,2 ^h 25,1-28,0 4,6%	20,9±0,8 ^h 20,1-22,2 3,6%	13,4±0,7 ^{dg} 12,3-14,0 4,8%	8,7±0,6 ⁱ 8,1-9,5 6,4%	8,6±0,6 ^d 7,9-9,4 6,9%	2,2±0,3 ^a 1,8-2,5 12,6%	4,0±0,4 ^e 3,8-4,7 8,7%	52,3±7,9 ^f 40,7-62,2 15,0%	25,2±4,6 ^e 19,0-31,3 18,2%
Роз.-красн. с бел. конч. кругл. (14 обр.)	21,0±1,7 ^e 16,5-23,5 8,2%	16,7±1,2 ^{ae} 14,2-18,4 7,1%	11,2±1,0 ^{ae} 9,9-12,9 8,6%	7,4±0,7 ^{ae} 6,2-8,5 9,8%	3,3±0,3 ^b 2,7-4,0 10,0%	2,8±0,3 ^{bd} 2,5-3,5 11,8%	1,2±0,2 ^b 0,9-1,7 15,1%	34,4±8,5 ^e 21,7-49,2 24,7%	17,7±4,1 ^a 12,0-24,6 23,1%
Роз.-красн. с белым конч. цилиндрический (16 обр.)	20,0±1,4 ^a 16,0-21,2 6,8%	16,4±0,7 ^a 15,0-17,9 4,4%	11,2±0,7 ^a 10,0-12,2 6,0%	7,4±0,7 ^a 6,4-8,4 10,0%	5,7±0,8 ^a 4,4-7,3 13,5%	2,2±0,3 ^a 1,9-2,8 12,0%	2,7±0,5 ^a 1,8-3,5 19,5%	31,0±7,0 ^{ab} 19,2-42,7 22,5%	16,6±3,6 ^{ab} 9,8-23,5 21,9%
Белый длинный (10 обр.)	22,1±1,4 ^f 20,0-24,9 6,4%	18,5±0,8 ^d 17,6-20,2 4,1%	11,9±0,6 ^f 11,1-12,6 5,1%	7,8±0,5 ^{df} 7,0-8,5 6,6%	7,4±0,7 ^c 6,0-8,4 9,9%	2,1±0,2 ^a 1,6-2,5 11,7%	3,7±0,6 ^d 2,5-4,5 17,2%	42,5±6,0 ^d 30,3-50,5 14,2%	21,4±3,2 ^d 16,5-26,9 15,0%
Красный длинноцилиндр. цельнолистный (7 обр.)	23,8±1,7 ^d 21,2-25,5 7,1%	19,1±0,6 ^d 17,9-19,9 3,2%	12,9±1,0 ^d 11,6-14,3 7,9%	8,2±0,4 ^d 7,8-8,9 4,6%	7,5±1,5 ^c 5,4-9,0 19,9%	2,1±0,3 ^a 1,7-2,4 12,1%	3,7±1,1 ^d 2,3-5,4 30,8%	45,5±4,6 ^d 40,2-52,3 10,2%	22,7±3,5 ^d 18,0-26,8 15,4%
Белый круглый цельнолистный (3 обр.)	21,4±0,9 ^{ef} 20,8-22,4 4,0%	17,0±0,8 ^{ae} 16,1-17,5 4,5%	12,5±0,7 ^{dg} 11,9-13,3 5,5%	7,7±0,4 ^{adefg} 7,4-8,1 4,9%	3,7±0,4 ^b 3,3-4,1 10,8%	2,8±0,4 ^{bd} 2,5-3,3 14,3%	1,3±0,2 ^b 1,1-1,5 15,0%	41,9±8,0 ^d 33,7-49,8 19,2%	23,7±4,9 ^{de} 19,5-29,1 20,6%
Среднее по коллекции (115 обр.)	20,2±2,9 14,4-28,0 14,4%	16,3±2,1 11,8-22,2 13,1%	11,2±1,3 8,5-14,3 11,9%	7,2±1,0 5,2-9,5 13,3%	4,6±1,9 2,7-9,4 41,2%	2,6±0,4 1,6-3,5 15,1%	1,9±1,1 0,9-5,4 56,7%	34,3±9,4 16,8-62,2 27,4%	18,1±4,4 9,8-31,3 24,3%

Примечание: Данные по сортотипам Светло-розовый овальный, Желтый круглый, Белый круглый, Красно-розовый короткоцилиндрический цельнолистный и Красный округлый лировиднолистный не приведены в таблице. Все данные представлены как Mean±SD, X_{min}- X_{max}, Cv, %

^{a-i} Значения с разным надстрочным индексом в столбце существенно различались при p < 0,05 (Tukey's HSD test)

Таблица 3. Характеристика сортотипов редьки по морфологическим признакам и продуктивности, среднее за 2016-2018 гг.

Сортотип	Высота розетки, см	Диаметр розетки, см	Длина листа, см	Ширина листа, см	Длина корнепл., см	Диаметр корнепл., см	Индекс корнепл.	Масса растения, г	Масса корнеплода, г
Зимняя черная круглая (11 обр.)	25,3±1,6 ^a 22,7-28,5 6,3%	30,8±2,4 ^{abc} 27,8-35,4 7,8%	15,2±0,6 ^{abc} 14,0-16,1 4,2%	10,6±0,3 ^{bd} 10,2-11,2 3,2%	6,5±0,9 ^{bcd} 5,3-7,9 13,7%	6,9±0,7 ^{bcd} 6,0-7,9 9,8%	0,9±0,1 ^{cde} 0,8-1,1 9,1%	339,8±97,7 ^{abc} 245,1-583,5 28,8%	223,3±78,6 ^{abcde} 153,2-413,5 35,2%
Зимняя белая круглая (4 обр.)	25,3±4,4 ^{ab} 21,8-30,9 17,4%	33,2±1,3 ^c 32,3-35,1 3,9%	13,9±1,3 ^{abc} 12,0-15,2 9,6%	10,5±0,7 ^{abd} 10,0-11,4 6,2%	8,1±0,4 ^b 7,5-8,4 5,3%	7,7±0,3 ^c 7,4-8,0 3,5%	1,1±0,1 ^{bc} 0,9-1,1 9,1%	455,3±29,0 ^{abc} 424,9-484,5 6,4%	310,1±35,9 ^{abcde} 268,3-355,8 11,6%
Лоба белая длинно- цилиндр. (14 обр.)	24,0±3,4 ^a 18,9-29,4 14,2%	28,4±2,8 ^{ab} 21,2-32,0 9,7%	14,3±1,2 ^{abc} 12,4-16,3 8,2%	9,7±0,8 ^{abc} 8,5-11,1 8,7%	14,5±3,1 ^a 8,0-19,4 21,0%	5,7±0,9 ^a 3,5-6,8 16,0%	2,7±1,0 ^d 1,2-5,5 37,8%	462,9±108,1 ^{abc} 362,4-691,5 23,4%	272,6±76,8 ^{abcde} 124,4-394,0 28,2%
Лоба зеленая цилиндрическая (6 обр.)	23,9±1,5 ^a 21,2-25,4 6,3%	29,2±2,4 ^{ab} 26,3-32,3 8,3%	13,9±1,6 ^{bc} 11,5-15,2 11,4%	10,1±0,5 ^{abcd} 9,6-11,0 5,2%	11,2±3,2 ^{abce} 8,0-16,2 28,1%	5,7±0,5 ^{abd} 5,0-6,4 8,5%	2,0±0,8 ^{abcd} 1,3-3,3 37,4%	381,9±102,7 ^{abc} 275,1-571,7 26,9%	218,2±31,1 ^{abcde} 161,1-246,0 14,2%
Лоба красная цилиндрическая лировид. (4 обр.)	22,8±1,1 ^a 21,3-23,9 4,9%	28,4±1,4 ^{ab} 27,0-29,9 4,9%	13,3±0,6 ^{abc} 12,8-14,1 4,4%	9,5±0,4 ^{abcd} 9,2-10,1 4,4%	13,4±0,8 ^a 12,4-14,2 6,1%	5,9±0,4 ^{ab} 5,4-6,4 7,1%	2,3±0,2 ^{ab} 2,0-2,6 10,4%	377,8±64,6 ^{ac} 282,7-420,4 17,1%	278,5±53,6 ^{abcde} 199,6-318,7 19,2%
Лоба красная округлая лировид. (5 обр.)	23,8±3,5 ^a 18,1-27,4 14,6%	29,4±3,4 ^{ab} 26,0-33,9 11,7%	13,1±2,3 ^{cb} 9,3-15,2 17,2%	9,5±0,9 ^{abc} 8,5-10,5 9,2%	7,5±1,3 ^{bcd} 6,1-9,4 17,8%	6,1±0,5 ^{abdf} 5,3-6,5 8,5%	1,2±0,3 ^{bcd} 0,9-1,7 26,0%	306,4±49,0 ^{bc} 224,6-349,6 16,0%	179,0±36,2 ^{cde} 116,6-204,5 20,3%
Дайкон Камейдо (7 обр.)	25,2±4,1 ^{ab} 18,4-31,5 16,2%	28,3±2,9 ^{ab} 24,3-33,2 10,2%	14,5±2,4 ^{abc} 12,3-18,6 16,4%	9,3±0,8 ^{abc} 7,9-10,5 8,7%	17,9±3,4 ^m 13,6-22,9 19,1%	5,4±0,8 ^{abm} 3,9-6,2 13,8%	3,4±1,1 ^{abg} 2,2-5,5 31,6%	467,3±99,5 ^a 354,7-649,1 21,3%	297,8±78,3 ^{ab} 176,90-376,50 26,3%
Дайкон Миновасе (7 обр.)	25,5±3,4 ^a 20,6-29,8 13,4%	28,7±3,2 ^{abc} 24,3-33,2 11,0%	14,8±2,7 ^{abc} 10,0-17,8 18,0%	10,0±1,0 ^{abd} 8,3-11,5 10,0%	18,2±4,6 ^{gm} 13,3-26,6 25,4%	5,1±0,9 ^{abgm} 3,9-6,2 16,7%	3,8±1,4 ^j 2,1-5,5 36,3%	424,6±110,9 ^{abc} 324,0-636,6 26,1%	281,7±108,4 ^{abcd} 156,9-448,3 38,5%
Дайкон Миясиге (10 обр.)	24,2±3,9 ^a 19,3-30,9 16,2%	26,8±2,8 ^{ab} 22,0-31,4 10,3%	14,0±2,2 ^{abc} 11,9-19,3 16,0%	9,4±0,9 ^{abc} 7,8-11,2 9,9%	17,9±4,5 ^{am} 10,7-24,5 24,9%	5,1±0,8 ^{abgm} 3,8-6,6 15,5%	3,7±1,2 ^{gj} 1,8-5,3 33,2%	400,2±86,4 ^{abc} 316,0-570,7 21,6%	268,2±69,9 ^{abcd} 167,9-404,5 26,0%
Дайкон Сироагири (4 обр.)	25,5±3,2 ^{ab} 21,9-29,2 12,4%	30,0±1,0 ^{abc} 29,4-31,5 3,3%	14,3±0,4 ^{abc} 13,7-14,7 3,1%	8,9±0,6 ^c 8,2-9,6 6,7%	13,7±4,1 ^{am} 8,3-18,1 30,1%	6,0±0,2 ^{abcm} 5,8-6,3 3,8%	2,3±0,7 ^{abg} 1,4-3,1 30,4%	441,4±91,9 ^{ab} 313,2-512,6 20,8%	322,6±107,8 ^{ab} 170,5-421,9 33,4%
Среднее по коллекции (83 обр.)	24,7±3,5 18,1-34,3 14,2%	29,0±3,2 20,4-35,8 11,0%	14,4±1,8 9,3-19,3 12,5%	9,8±0,9 7,8-11,5 9,0%	13,4±5,6 5,3-26,6 41,8%	5,8±1,0 3,0-8,0 17,3%	2,5±1,5 0,8-8,0 59,3%	407,7±102,4 224,6-691,5 25,1%	259,8±79,9 80,5-448,3 30,8%

Примечание: данные по сортотипам Летняя круглая, Роз.-красная цилиндр. цельн., типам дайкона Ниненго, Сакураджима и Шогоин не приведены в таблице. Все данные представлены как Mean±SD, X_{min}- X_{max}, C_v, %;

^{a-j} Значения с разным надстрочным индексом в столбце существенно различались при p < 0,05 (Tukey's HSD test).

В зимней теплице и светокультуре образцы формировали корнеплод меньшей массы, в весенней теплице масса корнеплода у образцов в среднем была несколько выше, чем в зимней теплице, в открытом грунте самая высокая.

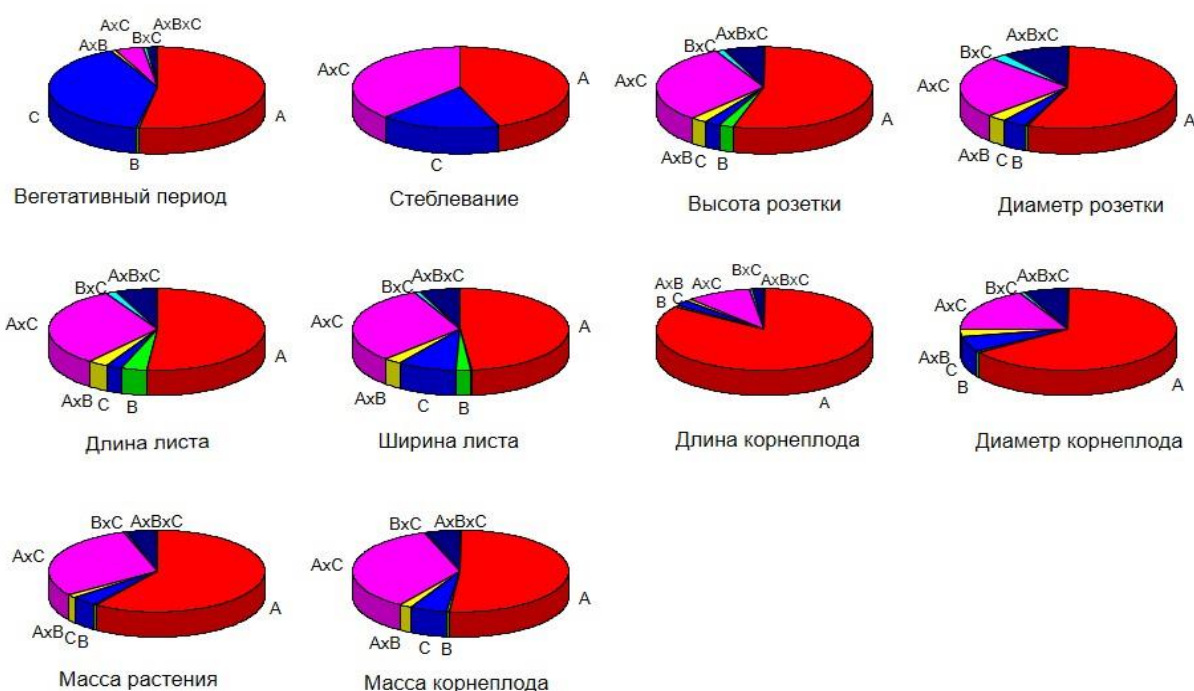


Рис. 2. Вклад факторов и их взаимодействий в общую дисперсию количественных признаков редиса ($p \leq 0,05$), где A – генотип, B – год, C – условие выращивания.

Основной вклад в изменчивость большинства фенотипических признаков редиса вносит фактор «генотип», что означает, что большая часть изменчивости признаков заложена в генетической основе образцов (рис. 2). Также установлено наличие взаимодействия «генотип×условие выращивания», что обуславливает ответную реакцию образцов на изменение условий среды.

У редьки средней изменчивостью характеризовались признаки листового аппарата, а признаки корнеплода - высокой. Большая изменчивость морфологических признаков редьки обусловлена в первую очередь контрастными климатическими условиями сроков выращивания. Отмечено снижение размеров розетки и листа при летнем посеве в целом. Выявлено сокращение длины и диаметра корнеплода при весеннем и летнем сроке посева в 2017 году. Масса растения и корнеплода образцов редьки при весеннем посеве несколько увеличивалась при выращивании в 2017 году, что связано со сложившимся благоприятным температурно-влажностным режимом для роста и развития растений. Выявлены отрицательные корреляционные связи между суммой осадков и массой растения ($r = -0,52$, $p \leq 0,05$) и корнеплода ($r = -0,38$, $p \leq 0,05$).

При летнем сроке посева наблюдались сильные различия между образцами редьки разных подвидов по признакам розетки и листа в годы выращивания. Высота розетки у образцов японского подвида и диаметр розетки у образцов китайского подвида слабо изменялись в годы выращивания, остальные признаки сильно варьировали. Наиболее сильная изменчивость длины корнеплода наблюдалась у образцов японского подвида, а диаметра корнеплода – у образцов европейского подвида. Увеличение массы растения и

корнеплода происходило у всех образцов в 2018 году, при этом наибольшую массу формировали образцы японского подвида, меньшую – образцы китайского подвида.

В изменчивость большинства фенотипических признаков редьки при двух сроках выращивания в равной степени вносят фактор «генотип» и взаимодействие «генотип×срок посева», что говорит об экологической пластичности и высокой климатической адаптивности образцов редьки японского и китайского подвида (рис. 3). При летнем выращивании (80 обр.) в изменчивость большинства признаков основной вклад вносил фактор «генотип», но при этом отмечено, что взаимодействие «генотип×год» играет немаловажную роль в развитии фенотипических признаков под влиянием неблагоприятных климатических условий в годы выращивания.



Рис. 3. Вклад факторов и их взаимодействий в общую дисперсию количественных признаков редьки ($p \leq 0,05$) при двух сроках посева (20 обр.), где А – генотип, В – год, С – срок посева:

Выделены образцы редиса и редьки с малой изменчивостью основных фенотипических признаков в разных условиях выращивания. Так, интерес представляют образцы редиса сортотипов Красный овально-округлый и Розово-красный с белым кончиком округлый для выращивания в защищенном и открытом грунте, сортотипов Светло-розовый овальный и Розово-красный с белым кончиком цилиндрический – для светокультуры. Среди коллекции редьки интерес представляют образцы зимних редек европейского происхождения, среди азиатских подвида – лобы зеленой разновидности и дайконы типа Камейдо, Миновасе и Сироагири для выращивания в Ленинградской области.

3.2 Урожайность и параметры экологической пластичности и адаптивности образцов *R. sativus*

Пределы варьирования общей урожайности составили у редиса 1,97-6,25 кг/м² (CV=24,4%), у редьки – 0,77-4,27 кг/м² (CV=31,0%)

В результате изучения урожайности выделены высокоурожайные образцы редиса и редьки разных подвидов. Отмечено, что образцы редиса сортотипа Красный овально-округлый, имея небольшую массу корнеплода (10,5-19,6 г), за счет своей скороспелости способны формировать высокотоварные корнеплоды во всех изученных условиях выращивания, при этом возможно повышение урожайности за счет увеличения количества растений на 1 м²; образцы редиса других разновидностей и сортотипов характеризуются большей массой корнеплода (14,2-29,1 г) и товарной урожайностью (2,4-3,8 кг/м²). Снижение товарности редиса в большей степени связано с одновременным формированием корнеплодов, ранним стеблеванием и ухудшением качества корнеплода (растрескивание, дрябление), редьки – с неоднородностью по времени формирования корнеплодов, их растрескиваемостью и поражением личинками капустной мухи.

На формирование признака урожайности образцов редиса в годы исследования наибольшее влияние оказывало взаимодействие «генотип×условие выращивания» (54,2%), а также значительное влияние оказал фактор «генотип» (33,2%), что указывает в целом на высокую адаптивность изученных образцов и как следствие среднюю вариабельность их урожайности в зависимости от условий выращивания.

Для оценки параметров экологической пластичности и адаптивности изучено 20 образцов редьки китайского и японского подвида, выращенных при двух сроках посева. В формирование их урожайности за годы исследований наибольший вклад вносили фактор «генотип» (39,9%) и взаимодействие «год×срок посева» (22,8%), немаловажное влияние оказали взаимодействия «генотип×срок посева» (17,0%) и «генотип×год×срок посева» (12,3%).

Исходя из рассчитанного индекса среды, выявлено, что худшие условия для развития растений редиса сложились в зимней теплице ($I_j = -0,3$), а лучшие – в открытом грунте ($I_j = +0,4$); для редьки – лучшие условия сложились при летнем посеве в 2018 году ($I_j = +0,8$) и при весеннем посеве в 2017 году ($I_j = +0,4$), худшие условия – при летнем посеве в 2017 году ($I_j = -0,9$) и при весеннем посеве в 2018 году ($I_j = -0,4$), что сказалось в разной степени на урожайности образцов.

При оценке экологической пластичности и стабильности выявлены два образца редиса (Neoro, к-2166, Нидерланды и Champion, к-2111, Чили), которые отзывчивы на улучшение условий выращивания ($b_i = 1,1$ и $0,7$; $S_i^2 = 0,7$ и $0,5$) и при этом имеют стабильную товарную урожайность (3,1 и 2,6 кг/м²). Выделены следующие группы образцов редиса и редьки по признакам пластичности и стабильности: 1) образцы интенсивного типа (b_i значительно выше 1) – преимущественно образцы редиса сортотипа Красный овально-округлый и образцы китайского подвида, и селекционные образцы дайкона из Японии; 2) образцы, характеризующиеся средней пластичностью и средней стабильностью ($1 \leq b_i < 2$) – преимущественно образцы редиса сортотипа Розово-красный с белым кончиком округлый и дайкона типа Миновасе и Миясиге; 3) образцы, характеризующиеся низкой пластичностью и высокой стабильностью (b_i значительно ниже 1) – образцы редиса белой и желтой разновидности и некоторые образцы лобы зеленой и розово-красной разновидности и дайконы из Японии; 4) образцы, характеризующиеся низкой пластичностью и стабильностью – селекционные образцы редиса розово-красной, пестрой и белой разновидности предназначенные для выращивания в определенных культивационных сооружениях, и некоторые образцы дайкона типа Ниненго и Сироагири, которые предназначены для выращивания на тяжелых глинистых почвах.

3.3 Комплексная биохимическая характеристика культур *R. sativus*

В результате проведенных биохимических исследований культур *R. sativus* получены новые данные об их химическом составе. Применяя метаболомное профилирование, установили около 200 компонентов химического состава образцов редиса и редьки. Идентифицировано 140 компонентов из групп органических кислот (22,9%), свободных аминокислот (17,9%), в том числе незаменимых, свободных жирных кислот (12,1%), в том числе незаменимых, многоатомных спиртов (7,1%), сахаров (16,4%), а также фенолсодержащих соединений (13,6%), алканов (6,4%) и прочие вторичные метаболиты (3,6%). Идентифицированы метаболически активные производные сахаров, лактоные и фосфатные формы органических кислот, тритерпеновые гликозиды и изопреноиды, жирные кислоты с дополнительными функциональными метильными и гидроксильными группами.

Выделены образцы редиса и редьки, которые отличались повышенным содержанием сухого вещества, аскорбиновой кислоты и БАВ, которые могут быть вовлечены в селекционный процесс по улучшению вкусовых и питательных качеств растений редиса и редьки.

3.4 Сопряженность количественных признаков *R. sativus*, взаимосвязь и направленность их изменчивости

При подборе исходного материала для селекционной работы необходимо учитывать не только хозяйственно ценные признаки, но также степень и характер корреляций между ними.

При анализе сопряженности фенотипических признаков редиса при каждом условии выращивания выявлено, что в условиях весенней теплицы и интенсивной светокультуры корреляции между признаками проявлялись сильнее, нежели в условиях зимней теплицы и открытом грунте; у редьки – при весеннем сроке посева корреляции между признаками проявлялись сильнее, нежели при летнем сроке.

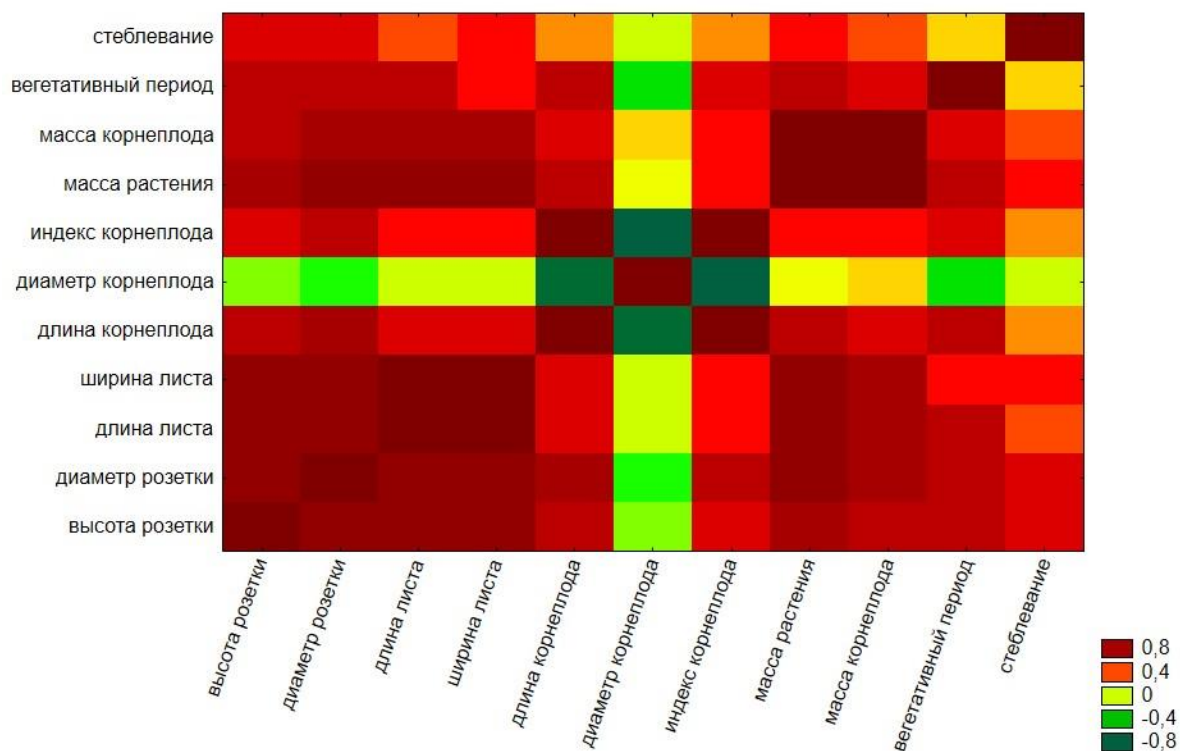


Рис. 4. Корреляции основных количественных признаков редиса

На основании выявленных корреляций выявлено что масса растения и корнеплода у редиса в большей степени зависит от размеров листового аппарата, нежели от размеров корнеплода. Средняя взаимосвязь вегетативного периода с признаками листового аппарата и корнеплода характеризует среднеспелые и позднеспелые образцы как наиболее урожайные (рис. 4).

Средняя связь содержания сухих веществ в корнеплоде с вегетативным периодом ($r=0,65$, $p\leq 0,05$) и суммой сахаров ($r=0,61$, $p\leq 0,05$) позволяет предположить, что образцы с более поздним сроком созревания имеют в корнеплодах большее суммарное содержание сахаров. Содержание аскорбиновой кислоты в корнеплоде в средней и слабой степени отрицательно связано с содержанием сухих веществ в корнеплоде ($r=-0,68$, $p\leq 0,05$) и вегетативным периодом ($r=-0,35$, $p\leq 0,05$), что характеризует скороспелые образцы редиса большим содержанием аскорбиновой кислоты.

При анализе сопряженности признаков редьки при каждом сроке посева (весенний и летний) выявлено, что в целом при весеннем сроке посева корреляции между признаками проявлялись сильнее, нежели при летнем сроке. На основании выявленных корреляций установлено, что размеры корнеплода в большей степени зависят от диаметра розетки и вегетативного периода, масса растения и корнеплода слабо связаны с другими признаками, средняя взаимосвязь вегетативного периода с признаками листового аппарата и корнеплода характеризует образцы с длинным корнеплодом как более скороспелые (рис. 5).

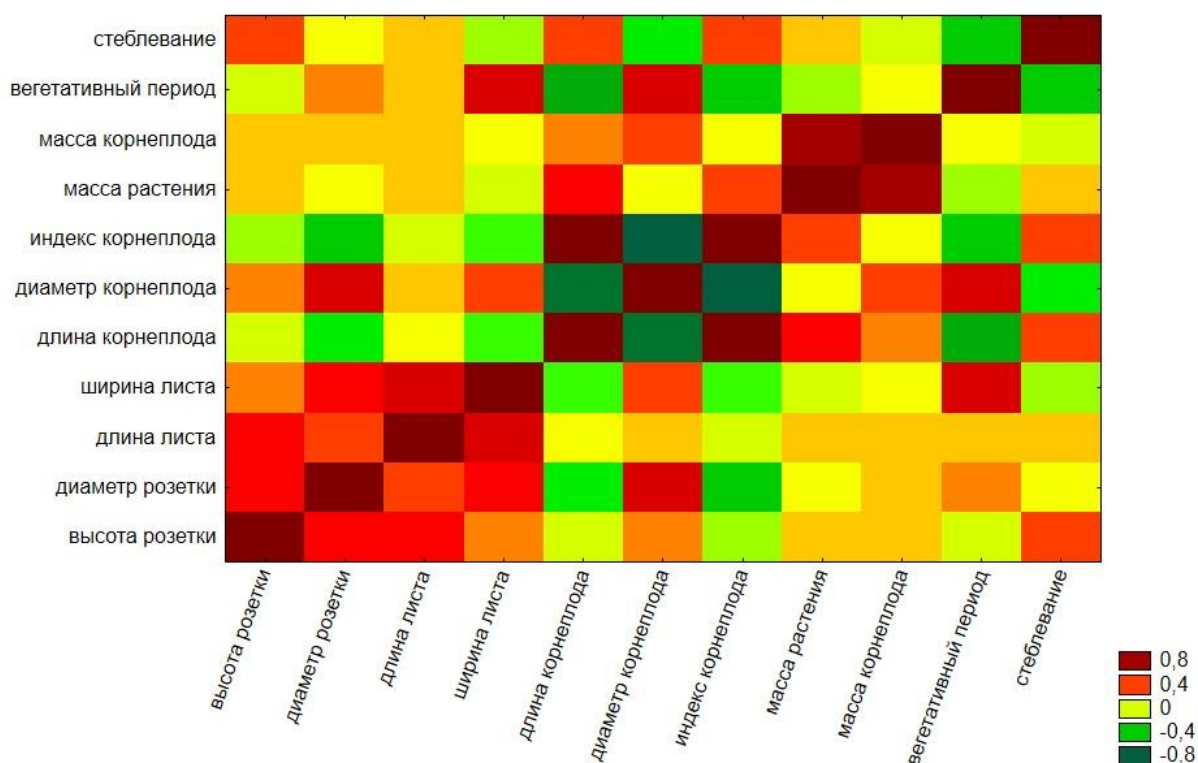


Рис.5. Корреляции основных количественных признаков редьки

Сильная корреляционная связь содержания сухих веществ в корнеплоде с вегетативным периодом ($r=0,80$, $p\leq 0,05$) и средняя отрицательная с суммой сахаров ($r=-0,44$, $p\leq 0,05$) позволяет предположить, что образцы с более поздним сроком созревания имеют в корнеплодах большее содержание сухих веществ, но меньше сахаров.

В результате анализа 13 фенотипических и биохимических признаков редиса и редьки методом главных компонент было установлено, что их изменчивость

определяется в основном пятью факторами. В совокупности они определяют общую дисперсию у редиса на 91,58%, у редьки - на 84,52%.

3.5 Алюмоустойчивость культур *R. sativus*

Избыток алюминия и водорода (низкий pH) в питательном растворе негативно влияют на рост и развитие зародышевых корней проростков редиса и редьки. При всех испытанных концентрациях $\text{AlCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$, наблюдали существенные различия между образцами *R. sativus* по длине отрастания корня. В целом, образцы редьки оказались более устойчивыми к алюмострессу нежели образцы редиса независимо от концентрации, что вероятно связано с процессами формообразования.

При разной напряженности стрессора наиболее четко проявлялись различия между образцами редиса при концентрации Al 83 мМ, между образцами редьки – при концентрации 99 мМ.

Образцы редиса и редьки по длине отрастания корня в зависимости от концентрации алюминия разделились на несколько статистически достоверных групп (рис. 6). Выявлено, что образцы обеих культур формируют четыре группы с диапазоном отрастания корня от 0,0 до 1,6 см при концентрации 83 и 99 мМ.

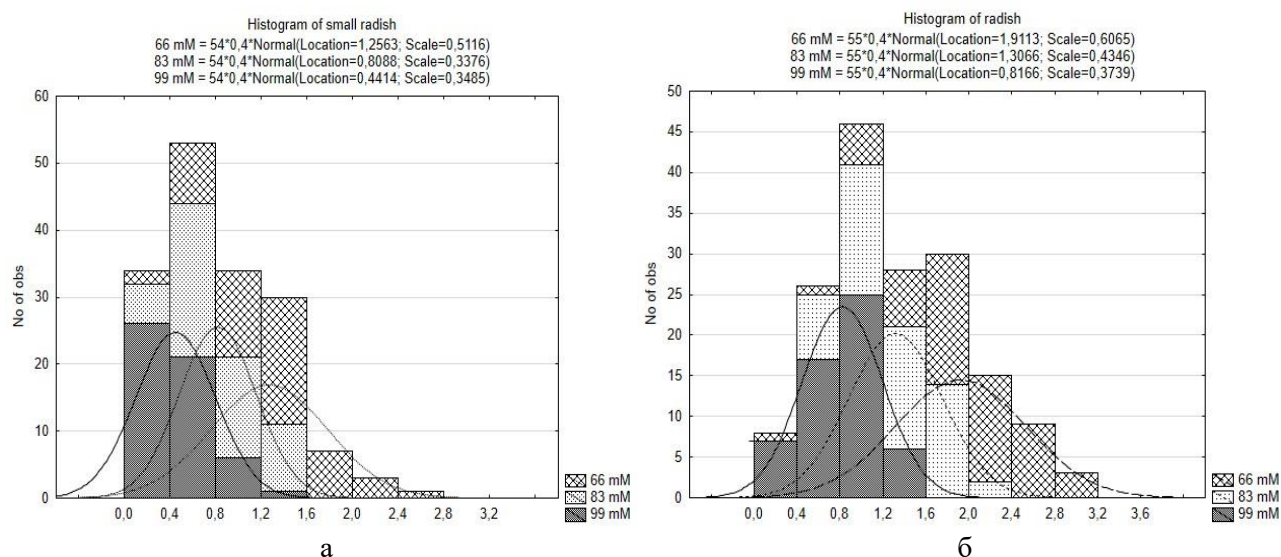


Рис. 6. Гистограмма распределения образцов редиса (а) и редьки (б) по длине отрастания корня при различных концентрациях хлорида алюминия

Исходя из полученных результатов, мы предлагаем шкалу устойчивости для культур *R. sativus* по признаку алюмотолерантности: отрастание корня до 0,40 см – неустойчивые, от 0,41 до 0,80 см – слабоустойчивые, от 0,81 до 1,20 см – среднеустойчивые, более 1,21 см – высокоустойчивые.

Слабоустойчивыми и неустойчивыми к алюмострессу оказались образцы *R. sativus* среднеазиатского происхождения (Азербайджан, Узбекистан, Афганистан и др.), а также из стран Африки (Алжир, Эфиопия). Среднеустойчивые образцы были в основном европейского происхождения (Нидерланды, Германия, Италия и др.), а также из США и Чили. Образцы редиса и редьки из таких стран как Россия, Венгрия, Турция, Китай, Япония, Ю.Корея и Казахстан обладали разной степенью устойчивости, образцы одного географического происхождения могли оказаться как алюмотолерантными, так и чувствительными к воздействию алюминия. Наиболее алюмотолерантными были образцы дайкона из Японии типа Камейдо и Сироагири из Ю. Кореи, местные образцы

зеленой лобы из Казахстана и образцы редиса китайского подвида российской селекции, которые были получены путем отбора и гибридизации из популяции азиатских редек.

Мы рекомендуем концентрацию 83 мМ $\text{AlCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ для оценки алюмоустойчивости редиса, а концентрацию 99 мМ – для оценки редьки. Разработанный нами метод предлагается в качестве экспресс-диагностики алюмотолерантности для быстрого скрининга широкого спектра генотипов *R. sativus* и последующего изучения контрастных форм при более длительном выращивании растений в гидропонной культуре (включая элементный анализ корней и побегов, контрастных по устойчивости образцов), а также реакций растений в почвенных условиях.

3.6 Комплексная характеристика сортотипов и источники ценных признаков *R. sativus* для селекции

В результате проведенных исследований по изучению образцов *R. sativus* коллекции ВИР дополнены описания некоторых сортотипов новыми пределами изменчивости фенотипических и биохимических признаков, создан сорт редиса Викуся и выделены источники ценных признаков для селекции разных направлений. Выявлено, что перспективный исходный материал для селекции, стабильно сохраняющий высокие показатели, относится главным образом у редиса к сортотипам Красный овально-округлый и Розово-красный с белым кончиком округлый европейского происхождения, у редьки – к лобам сортотипа Белая длинно-цилиндрическая преимущественно из Ю. Кореи и дайконам типа Камейдо, Миясиге и Сироагири из Японии.

Заключение

В ходе многолетних полевых и лабораторных исследований изучено большое разнообразие культур *R. sativus* в разных экологических условиях, создаваемых различными способами выращивания. Определены статистические параметры количественных признаков культур вида, разновидностей и сортотипов, их вариабельность под влиянием факторов внешней среды, их вклад и характер влияния на параметры продуктивности культур, а также экологическая устойчивость изучаемых образцов. Определены относительно стабильные и высоко варьирующие признаки *R. sativus*. Наибольшей амплитудой варьирования у редиса и редьки обладают признаки длины и массы корнеплода, с разной степенью варьирования в зависимости от ботанической и агробиологической принадлежности.

Образцы *R. sativus* обладают разной фоточувствительностью, которая обуславливается как генотипом, так и взаимодействием генотипа с агроклиматическими показателями (различное сочетание температуры и длины светового дня). Нейтральные к фотопериоду формы находятся преимущественно среди образцов редиса сортотипов Розово-красный с белым кончиком цилиндрический, Красный овально-округлый и Розово-красный овальный европейского подвида и образцов китайского подвида; и среди образцов редьки европейского подвида зимней разновидности и азиатских подвидов – лобы зеленой разновидности и дайконы типа Камейдо и Сироагири.

Благодаря изучению особенностей формирования урожая, экологической пластичности и стабильности, а также адаптивных способностей культур *R. sativus* в условиях Ленинградской области выделены сортотипы редиса и редьки с высокой устойчивостью к стрессовым условиям произрастания и наибольшими эффектами ОАС и САС.

Получены новые данные о химическом составе корнеплодов и листьев редиса и редьки, с помощью метаболомного профилирования идентифицирован широкий спектр

вторичных метаболитов. Определены закономерности накопления и изменчивости компонентов химического состава в зависимости от ботанической и агробиологической принадлежности, а также от условий выращивания.

Изучение корреляционной структуры фенологических, морфологических и биохимических признаков образцов *R. sativus* с помощью метода главных компонент позволило выявить направленность изменчивости основных количественных признаков и их взаимосвязь.

Модифицирован экспресс-метод оценки алюмоустойчивости, идентифицированы контрастные по устойчивости к алюминию образцы *R. sativus*. Предложена шкала устойчивости для культур *R. sativus* по признаку алюмотолерантности.

Проведенные исследования позволили выделить источники ценных признаков для селекции культур *R. sativus* и создать ультраскороспелый сорт редиса Вкуся.

Рекомендации для производства и селекционной практики.

1. Выделены образцы *R. sativus*, нейтральные к фотопериоду:

- образцы редиса сортотипов Розово-красный с белым кончиком цилиндрический, Красный овально-округлый и Розово-красный овальный и образцы китайского подвида;
- образцы редьки европейского подвида зимние и летние разновидности и азиатского подвида – лобы зеленой разновидности и дайконы типа Камейдо и Сироагири.

2. Выявлены сортотипы редиса и редьки с низкой изменчивостью основных фенотипических признаков в разных условиях выращивания. Рекомендуется использование:

- для выращивания в защищенном и открытом грунте – образцы редиса сортотипов Красный овально-округлый и Розово-красный с белым кончиком округлый;
- для светокультуры – образцы редиса сортотипов Светло-розовый овальный и Розово-красный с белым кончиком цилиндрический;
- для выращивания в открытом грунте - образцы зимних редек европейского происхождения, лобы зеленой разновидности и дайконы сортотипов Камейдо, Миновасе и Сироагири.

3. Высокая устойчивость к стрессовым условиям произрастания характерна образцам редиса сортотипов Розово-красный с белым кончиком цилиндрический и Красный овально-округлый и образцам китайской редьки - лобы. Наибольшими эффектами ОАС и САС обладают в основном образцы редиса сортотипов Розово-красный с белым кончиком округлый и образцы китайского подвида.

4. Выделены следующие группы образцов редиса и редьки по признакам пластичности и стабильности:

- интенсивного типа – преимущественно образцы редиса сортотипа Красный овально-округлый и образцы китайского подвида, и селекционные образцы дайкона из Японии;
- средней пластичностью и средней стабильностью – преимущественно образцы редиса сортотипа Розово-красный с белым кончиком округлый и дайкона типов Миновасе и Миясиге;
- низкой пластичностью и высокой стабильностью – образцы редиса белой и желтой разновидности и некоторые образцы лобы зеленой и розово-красной разновидности и дайконы из Японии;
- низкой пластичностью и стабильностью – селекционные образцы редиса розово-красной, пестрой и белой разновидности, предназначенные для выращивания в

определенных культивационных сооружениях, и образцы дайкона типа Ниненго и Сироагири.

5. Высоким содержанием сухого вещества в корнеплодах характеризуются редис и редька китайского подвида, и позднеспелые образцы европейского подвида. Высокое содержание свободных аминокислот характерно образцам редиса пестрой и белой разновидности:

- валин, лейцин, изолейцин больше накапливают образцы китайского подвида с белой окраской корнеплода и сортотипа Розово-красный с белым кончиком округлый;
- треонин, метионин и фенилаланин больше накапливают образцы сортотипов Розово-красный с белым кончиком округлый и Белый длинный;
- лизин и триптофан больше накапливают образцы китайского подвида.
- у редьки высоким содержанием свободных аминокислот характеризуются образцы лобы и дайкона из Японии и Ю. Кореи.
- содержание незаменимых аминокислот больше в образцах японской редьки, по сравнению с остальными подвидами.
- Образцы редиса пестрой разновидности (*var. striatus*) более стабильны в накоплении сухого вещества, аскорбиновой кислоты, фенольных соединений и аминокислот в разных условиях выращивания.

6. Предложена шкала устойчивости для культур *R. sativus* по признаку алюмотолерантности. Слабоустойчивыми и неустойчивыми к алюмострессу являются образцы *R. sativus* среднеазиатского происхождения (Азербайджан, Узбекистан, Афганистан и др.), а также из стран Африки (Алжир, Эфиопия). Среднеустойчивые образцы в основном европейского происхождения (Нидерланды, Германия, Италия и др.), а также из США и Чили. Образцы редиса и редьки из России, Венгрии, Турции, Китая, Японии, Ю.Кореи и Казахстана обладают разной степенью устойчивости. Наиболее алюмотолерантными являются образцы дайкона из Японии типа Камейдо и Сироагири из Ю. Кореи, местные образцы зеленой лобы из Казахстана и образцы редиса китайского подвида российской селекции.

6. Самый перспективный исходный материал для селекции относится у редиса к сортотипам Красный овально-округлый и Розово-красный с белым кончиком округлый европейского происхождения, у редьки – к лобам сортотипа Белая длинно-цилиндрическая преимущественно из Ю. Кореи и дайконам типов Камейдо, Миясиге и Сироагири из Японии.

Перечень работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи

1. Курина, А.Б. Оценка редиса коллекции ВИР по биологическим и хозяйственным признакам в условиях зимней и весенней теплиц / А.Б. Курина, А.М. Артемьева // Агрофизика. - 2016. - №4. С.35-42.
2. Курина, А.Б. Биологические особенности редьки и редиса (*Raphanus sativus* L.) коллекции ВИР при летнем сроке выращивания в условиях Ленинградской области / А.Б. Курина, А.М. Артемьева // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. - 2017. - №1(46). - С.25-31.
3. Курина, А.Б. Генетическое разнообразие корнеплодных растений *Raphanus sativus* L. (редис и редька) коллекции ВИР / А.Б. Курина, Т.В. Хмелинская, А.М. Артемьева // Овощи России. – 2017. - №5. – С.9-13.DOI: 10.18619/2072-9146-2017-5-9-13

4. Курина, А.Б. Генетическое разнообразие и биохимическая ценность корнеплодных овощных растений семейства Капустные (Brassicaceae Burnett) / А.Б. Курина, Д.Л. Корнюхин, А.М. Артемьева // Вестник НГАУ. – 2018. - №4(49). - С. 81-92. DOI:10.31677/2072-6724-2018-49-4-81-92.

5. Курина, А.Б. Биологические особенности редиса (*Raphanus sativus* L.) при выращивании в условиях интенсивной светокультуры / А.Б. Курина, А.М. Артемьева, Н.Г. Синявина, А.А. Кочетов, Г.Г. Панова // Картофель и овощи. – 2019. - №4. - С. 26-29. DOI: 10.25630/PAV.2019.68.78.004

6. Курина, А.Б. Морфофизиологическая изменчивость редиса (*Raphanus sativus* L.) при выращивании в различных условиях / А.Б. Курина, А.М. Артемьева // Агрофизика. - 2020. - №1. - С.52-58. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.08

7. Курина, А.Б. Генетическое разнообразие *Raphanus sativus* L. коллекции ВИР по алюмоустойчивости / А.Б. Курина, И.А. Косарева, А.М. Артемьева // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2020. - №24(6). – С.613-624. DOI: 10.18699/VJ20.655

8. Kurina, A.B. Genetic diversity of phenotypic and biochemical traits in VIR radish (*Raphanus sativus* L.) germplasm collection / A.B. Kurina, D.L. Kornukhin, A.E. Solovyeva, A.M. Artemyeva // Plants. – 2021. - №10(9). – С.1799. DOI: 10.3390/plants10091799

9. Kurina, A.B. Nutritional and biologically active compounds in Russian (VIR) Brassicaceae vegetable crops collection / A.E. Solovyeva, T.V. Shelenga, A.V. Konarev, A.B. Kurina, D.L. Kornukhin, D.A. Fateev, A.M. Artemyeva // Turk. J. Agric. For. – 2021. - №45(5). – С.541-556. DOI: 10.3906/tar-2010-95

Патенты

10. Патент РФ на сорт № 11305. Сорт редиса Викася /Курина А.Б., Корнюхин Д.Л., Хмелинская Т.В. Выдан по заявке № 77608 датой приоритета 27.10.2020. Патентообладатель: ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (190031, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42,44). Зарегистрировано в Государственном реестре селекционных достижений Российской Федерации 06 декабря 2018 г.

Прочие издания–материалы конференций, каталоги в том числе:

11. Kurina, A.B. Evaluation of morpho-biological and economic traits in VIR small radish collection under winter and spring growing / A.B. Kurina, T.V. Khmelinskaya, A.M. Artemyeva. // Biotehnologii avansate – realizări perspective. al IV-lea Simpozion național cu participare internațională. 2016. С. 145.

12. Курина, А.Б. Особенности накопления фенольных соединений европейскими и азиатскими разновидностями редиса (*Raphanus sativus* L.) / А.Б. Курина // Конференция «Ломоносов 2018». Секция Физиология растений. 2018.

13. Курина, А.Б. Биохимические особенности редиса (*Raphanus sativus* L.) коллекции ВИР для целей хемосистематики / А.Б. Курина, А.М. Артемьева, А.Е. Соловьева, Т.В. Шеленга // IV (XII) Международная ботаническая конференция молодых учёных. 2018

14. Курина, А.Б. Особенности накопления фенольных соединений европейскими и азиатскими разновидностями редиса (*Raphanus sativus* L.) / А.Б. Курина, А.М. Артемьева, А.Е. Соловьева, Т.В. Шеленга // Сборник научных статей по материалам X Международного симпозиума «Фенольные соединения: функциональная роль в растениях». 2018. – С. 233-237.

15. Kurina, A. Trait collection of VIR small radish (*Raphanus sativus* L.) / Kurina, A., Artemyeva A. // 21st Crucifer Genetics Conference «Brassica 2018», July 1-4, Saint-Malo, France. 2018.

16. Курина, А.Б. Местные сорта овощных и бахчевых культур / А.М. Артемьева, И.В. Гашкова, Т.М. Пискунова, Т.В. Хмелинская, А.Б. Курина и др. // Каталог Мировой коллекции ВИР. вып. 857, ВИР, СПб. 2018. 75 с. DOI: 10.30901/978-5-905954-62-7
17. Курина, А.Б. Редис (*Raphanus sativus* L.): характеристика образцов по морфологическим, биологическим и хозяйственно ценным признакам при выращивании в защищенном и открытом грунте / А.Б. Курина, Т.В. Хмелинская // Каталог Мировой коллекции ВИР, вып. 878, ВИР, СПб. 2018. 69 с. DOI: 10.30901/978-5-905954-93-1
18. Курина, А.Б. Признаковая коллекция *Raphanus sativus* L. ВИР / А.Б. Курина, А.М. Артемьева // Сборник тезисов «125 лет прикладной ботаники в России». 2019. С.155 DOI: 10.30901/978-5-907145-39-9
19. Курина, А.Б. Редька (*Raphanus sativus* L.): характеристика образцов по морфологическим, биологическим и хозяйственно ценным признакам при разных сроках выращивания / А.Б. Курина // Каталог Мировой коллекции ВИР, вып. 926, ВИР, СПб. 2020. 68 с. DOI: 10.30901/978-5-907145-54-2