ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 631.523:633.852.53:631.524.84
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-2-38-49

CC BY

Изучение регенерантных линий сои по хозяйственно ценным и биохимическим характеристикам

Е. С. Бутовец[1], Л. М. Лукьянчук[1], Г. А. Кодирова[2], Г. В. Кубанкова[2], О. С. Ефремова[3]

[1] Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока имени А.К. Чайки, Уссурийск, Россия

[2] Федеральный научный центр Всероссийский научно-исследовательский институт сои, Благовещенск, Россия

[3] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Сергеевна Бутовец, otdelsoy@mail.ru

Актуальность. Ионы тяжелых металлов могут быть причиной стресса у растений, приводящего к генетическим изменениям. В ряде исследований показана возможность их применения в качестве мутагенного фактора при работе *in vitro*. Изучение влияния ионов Cu^{2+} и Cd^{2+} на показатели хозяйственно ценных признаков, качества семян, устойчивости к болезням регенерантных линий сои представляет интерес для селекции культуры.
Материалы и методы. Тестирование генетически измененных регенерантных линий сои проводилось в лаборатории сельскохозяйственной биотехнологии и лаборатории селекции сои Федерального научного центра агробиотехнологий Дальнего Востока имени А.К. Чайки, лаборатории переработки сельскохозяйственной продукции Всероссийского научно-исследовательского института сои. Объект исследования: 15 регенерантных линий сои и исходные сорта (‘Приморская 13’, ‘Приморская 301’, ‘Приморская 81’, ‘Ходсон’).
Результаты. В итоге были отобраны образцы, перспективные для селекционных целей, с высокими показателями хозяйственно значимых признаков, качественных характеристик семян и устойчивости к грибным заболеваниям, превышающие по изученным признакам исходные формы. Наибольшая урожайность отмечена у линий R 1490 (0,41 кг/м^2) и R 1606 (0,38 кг/м^2), крупносемянность – у R 1568 (масса 1000 семян – 200,0 г) и R 1609 (190,2 г). Комплексную устойчивость к грибным болезням на естественном фоне развития патогенов проявили R 1584, R 1568, R 1606, на искусственном – R 1490. Линии сорта ‘Ходсон’ выделялись повышенным содержанием белка, гистидина, валина, метионина + цистина, масла – R 1605, R 1609. У всех линий выявлены изменения в соотношении ненасыщенных жирных кислот $C_{18:2}/C_{18:1}$.

Ключевые слова: соя, регенеранты, тяжелые металлы, грибные болезни, содержание белка и масла, аминокислоты

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» на 2018–2020 гг. (грант № 0812-2018-0024).
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Бутовец Е.С., Лукьянчук Л.М., Кодирова Г.А., Кубанкова Г.В., Ефремова О.С. Изучение регенерантных линий сои по хозяйственно ценным и биохимическим характеристикам. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(2):38-49. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-2-38-49

© Бутовец Е.С., Лукьянчук Л.М., Кодирова Г.А., Кубанкова Г.В., Ефремова О.С., 2024

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-2-38-49

Studying regenerated soybean lines for their useful agronomic and biochemical characteristics

Ekaterina S. Butovets[1], Lyudmila M. Lukyanchuk[1], Galina A. Kodirova[2], Galina V. Kubankova[2], Olga S. Efremova[3]

[1] Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk, Russia

[2] All-Russian Research Institute of Soybean, Blagoveshchensk, Russia

[3] N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Ekaterina S. Butovets, otdelsoy@mail.ru

Background. The effect of heavy metal ions can cause ionic stress in plants – the problem of significant interest among researchers. This study was dedicated to the evaluation of genetically modified regenerated soybean lines obtained on nutrient media with heavy metal ions as a mutagenic factor.
Materials and methods. Genetically modified regenerated soybean lines were tested at the Agricultural Biotechnology Laboratory and Soybean Breeding Laboratory, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, and at the Agricultural Product Processing Laboratory, All-Russian Research Institute of Soybean. Fifteen regenerated soybean lines and source cultivars ('Primorskaya 13', 'Primorskaya 301', 'Primorskaya 81', and 'Hodson') served as the research material.
Results. Soybean accessions promising for further breeding were selected on the basis of their useful agronomic traits, grain quality, and resistance to fungal diseases. Accessions R 1490 (0.41 kg/m^2) and R 1606 (0.38 kg/m^2) were identified for having the highest yield in the experiment. Accessions R 1568 (1000 seed weight was 200.0 g) and R 1609 (190.2 g) had the largest seeds. Accessions R 1584, R 1568 and R 1606 manifested complex resistance to fungal diseases under natural conditions, while accession R 1490 was the most resistant under artificial infection pressure. The experiment resulted in selecting a group of lines regenerated from cv. 'Hodson' with high content of protein, histidine, valine, methionine, and cysteine. Accessions R 1605 and R 1609 demonstrated the highest oil content. The study revealed changes in the proportions of unsaturated fatty acids $C_{18:2}/C_{18:1}$ in all regenerant groups.

Keywords: soybean, heavy metals, fungal diseases, protein and oil content, amino acids

Acknowledgements: this work was financially supported by the Fundamental Scientific Research Program "Far East" of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for 2018–2020 (Grant No. 0812-2018-0024).
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Butovets E.S., Lukyanchuk L.M., Kodirova G.A., Kubankova G.V., Efremova O.S. Studying regenerated soybean lines for their useful agronomic and biochemical characteristics. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(2):38-49. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-2-38-49

Введение

В настоящее время соя (*Glycine max* (L.) Merr.) является одной из самых распространенных и востребованных в мире сельскохозяйственных культур. Она отличается уникальным биохимическим составом, создающим широкие возможности для многоцелевого промышленного использования. Главное достоинство сои – высокое содержание полноценного растительного белка (36–47%). Белки семян сои обладают высокой биологической ценностью благодаря сбалансированности аминокислотного состава. В соевом белке содержатся в достаточном количестве почти все незаменимые аминокислоты и в первую очередь лимитирующие, которыми бедны зерновые культуры, а по содержанию лизина белок сои не уступает сухому молоку и куриному яйцу (Petibskaya, 2012; Kipshakbayeva et al., 2022; Shahova et al., 2023).

Семена сои является источником не только белка, но и масла (15–27%). Соевое масло занимает ведущее место в мировом производстве растительных масел, а его качество определяется содержанием ненасыщенных жирных кислот, при этом на их долю приходится 85–87% от суммы всех жирных кислот (Buchanan et al., 2015; Tessari et al., 2016; Assefa et al., 2018). Биологические свойства масел определяются не только качественным составом жирных кислот, но и их соотношением. Для организма человека соотношение полиненасыщенных жирных кислот (линолевой/линоленовой) в растительных маслах должно составлять (1–10) : 1; более высокое соотношение способствуют развитию многих заболеваний, в том числе сердечно-сосудистых, воспалительных и аутоиммунных. В рационе здорового человека оптимальным соотношением считается 4 : 1. Согласно литературным данным, у сортов сои зарубежной селекции это соотношение составляло 9 : 1, а в сортах, выведенных в европейской части России – (4,8–8,6) : 1 (Petibskaya, 2012).

В связи с этим одним из значимых направлений в селекции сои, помимо создания сортов с высокой продуктивностью и адаптивностью, является селекция на улучшение пищевых и функциональных качеств семян, основанных на благоприятном для потребления балансе аминокислот в белках и жирных кислот в масле (Rozhanskaya et al., 2016; Li et al., 2020).

Как и многие абиотические факторы, ионы тяжелых металлов могут вызвать стресс у растений (Koshkin, 2010; Korotchenko, 2011; Reutova, 2017). Накопление металлов в молекулах нуклеиновых кислот провоцирует нарушение функционирования клеток, что может привести к генетическим изменениям (Tsyganov et al., 2008; Belimov, Tihonovich, 2011; Kulaeva, Tsyganov, 2011). Ограниченный ряд исследований по сое в данном направлении подтверждает актуальность проведения опытов по использованию тяжелых металлов в качестве мутагенного фактора при работе *in vitro*.

Тяжелые металлы, находящиеся в почве в дозе 2 ПДК, являются мутагенами для сои, вызывая многосемянность в бобах и формирование более крупного семени, которые наследуются в последующих поколениях (Dyomin et al., 2007; Tsmokalyuk, Sudakov, 2008). Учитывая мутагенные свойства ионов тяжелых металлов, одной из наших задач стало их применение для расширения генетического разнообразия регенерантных линий сои.

Климат Приморского края благоприятен для развития патогенной микобиоты. Существенный вред оказывают листовые формы грибных болезней сои, которые снижают ассимиляционную поверхность растений (Dega et al., 2022). Поэтому возникает необходимость поиска генотипов сои, сочетающих высокую продуктивность с устойчивостью к грибным патогенам, что является в настоящее время одним из важных направлений в растениеводстве и селекции растений (Butovets et al., 2020).

Целью настоящего исследования была оценка регенерантных линий сои, полученных на средах с ионами тяжелых металлов в качестве мутагенного фактора (Cu^{2+}, Cd^{2+}), по основным селекционно ценным признакам для дальнейшего их использования в селекционном процессе.

Для выполнения поставленной цели изучали следующие характеристики регенерантных линий и исходных форм сои: урожайность, массу 1000 семян, продолжительность периода вегетации растений и качественные характеристики семян (содержание белка, сбалансированность белка по аминокислотам, содержание масла, жирнокислотный состав масла). Также провели оценку степени устойчивости изучаемых сортов и регенерантных линий к местным популяциям патогенов на фоне естественного и искусственного развития заболеваний.

Материалы и методы

В качестве исходных форм для создания регенерантов взяли четыре сорта сои из семенной коллекции Федерального научного центра агробиотехнологий Дальнего Востока имени А.К. Чайки (ФНЦ агробиотехнологий): американский сорт ‘Ходсон’, российские сорта ‘Приморская 81’, ‘Приморская 13’, ‘Приморская 301’, а также ранее полученные от них регенеранты R 1 (исходная форма (и. ф.) ‘Приморская 301’), R 86 (и. ф. ‘Ходсон’) и R 565 (и. ф. ‘Ходсон’) (Vashchenko et al., 2014).

Получение регенерантных линий сои осуществляли в лаборатории сельскохозяйственной биотехнологии ФНЦ агробиотехнологий в 2015–2018 гг. (Efremova, Fisenko, 2017).

Процесс регенерации осуществляли в ламинар-боксе (БАВнп-01-«Ламинар-С»-1,2): стерильные семена помещали на питательную среду Мурасиге и Скуга (Murashige, Scoog, 1962) с половинным составом макро- и микросолей и добавлением цитокинина 6-бензиламинопурина (БАП) – среда А (контроль) и растворами солей тяжелых металлов как мутагенного фактора в перерасчете на ионы металлов: $CuSO_4 * 5H_2O$ (2 мг/л); $CdCl_2 * 2,5H_2O$ (5 мг/л, 10 мг/л) – среда А+ТМ (тяжелые металлы).

Через 14 дней у проростков в стерильном боксе эксплантировали семядольные узлы посредством удаления центрального побега, эпикотиля, гипокотиля и части семядолей. В таком виде экспланты, имеющие размер 1 см с частями семядолей 2-3 мм, помещали на свежую питательную среду.

Через две недели после посадки первичные экспланты на среде с ТМ образовали первые боковые побеги, которые были сняты и помещены на среды микроклонирования, а экспланты пересажены на свежую питательную среду с тем же содержанием ТМ, но уменьшенной концентрацией БАП (среда Б+ТМ). Этот процесс продолжали до полного прекращения морфогенеза стебля или регенерации боковых побегов из семядольного узла как в эксперименте, так и на контроле.

Пробирочный материал для дальнейшего развития помещали в климатическую камеру Sanyo (MLE-352H, Япония). Полученные побеги для укоренения культивировали на среде l/2 MS с добавлением мутагенного фактора в тех же концентрациях.

Микрорастения с хорошо развитой корневой системой пересаживали по одному растению в сосуд с почвенным грунтом (0,5 л), простерилизованном в паровом стерилизаторе (ВК-75, Россия). Дальнейшее развитие растения получали в условиях световой комнаты при освещении 3,5–4,0 тыс. люкс, t = +25°С и 16-часовом фотопериоде.

Изучение регенерантных линий проводили в полевых условиях. Испытания регенерантных линий и исходных сортов сои проходили в 2019–2021 гг. на полях лаборатории селекции сои ФНЦ агробиотехнологий в г. Уссурийске, который расположен в 90 км к северу от Владивостока (43°48' с. ш., 131°58' в. д.).

Суммарное значение активных температур (выше 10°С) варьировало в районе проведения исследований в пределах 2400–2600°С. Данные о температуре воздуха и осадках за период вегетации культуры (2019–2021 гг.) и среднемноголетние значения (за последние 30 лет) были предоставлены агрометеорологической станцией «Тимирязевский» (Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды).

Температурные условия были благоприятны для развития и роста сои. Среднемноголетнее количество осадков (за период с температурами > 10°С) для места выращивания культуры в среднем в месяц составляет 74,7 мм; среднемесячное значение за периоды вегетации составило: 2019 г. – 73,3 мм (7,0–226,5 мм), 2020 г. – 96,3 мм (10,9–193,5 мм) и 2021 г. – 41,6 мм (7,8–79,7 мм).

Почва в месте проведения опытов лугово-бурая отбеленная, тяжелого механического состава.

Для изучения высевали семена сортов (исходные формы) сои – 'Приморская 13', 'Приморская 301', 'Приморская 81', 'Ходсон' и 15 регенерантных линий. Опыт организован согласно методике полевого опыта (Dospekhov, 2012). Выращивание культуры проводилось в соответствии с агротехникой, адаптированной для Приморского края. В течение трех лет высев семян сои производился урожаем предыдущего года с нормой 500 тыс. шт./га на делянке площадью 1,8 м^2. Повторность опыта трехкратная, расположение делянок систематическое. Посевные и уборочные мероприятия осуществляли вручную. Анализ структуры урожая сои выполняли по 20 растениям каждого образца. В качестве стандарта для анализа линий сои использовали исходные сорта. Сохранность растений от всходов до уборки (число растений перед уборкой на 1 м^2) вычисляли по пособию Тверской ГСХА (Usanova, 2017).

Изучение устойчивости сортов и регенерантных линий сои к наиболее вредоносным грибным патогенам Приморского края проводилось на естественном инфекционном фоне и при искусственном заражении. За период изучения естественный инфекционный фон не достигал экономического порога по вредоносности болезней сои. Искусственное заражение растений проводилось суспензией патогенов сои – *Septoria glycines* Hemmi, *Cercospora sojina* Hara и *Peronospora manshurica* (Naum.) Syd. – на отдельных изолированных друг от друга участках. Культуры грибов *Septoria glycines* и *Cercospora sojina* определены и выделены в лаборатории селекции сои ФНЦ агробиотехнологий.

Экстрагирование грибной инфекции проводилось с пораженного растительного материала сои, собранного на полях учреждения. Для пересадки использовали культуральную среду – картофельно-глюкозный агар (КГА); в чашках Петри чистую культуру патогена выращивали при температуре +24…+26°С в термостате фирмы Binder (Германия) в течение 6-7 дней до появления конидий. Приготовление суспензий, содержащих споры грибов, выполнялось смывом выросших на КГА конидий стерильной дистиллированной водой. Так как *Peronospora manshurica* является паразитом, который развивается только на тканях живых растений, делали смыв спор с инфицированных зеленых листьев сои. Суспензии разбавляли для получения требуемой концентрации конидий в количестве 10 шт. (септориоз), 3 шт. (церкоспороз) и 30 шт. (пероноспороз) в поле зрения микроскопа. Плотность суспензий определялась под микроскопом Motik Microscores 1.3 MP при 80-кратном увеличении просмотром не менее 10 капель. Обработка образцов суспензиями осуществлялась в фазу образования трех-четырех тройчатых листьев растений при помощи ранцевого опрыскивателя с расходом жидкости 45 мл на м^2. Визуальную оценку и учет степени поражения (вычисление значения по площади поражения) листовой пластинки грибными болезнями (септориоз, церкоспороз, пероноспороз) проводили на стадии развития – формирования семени в бобе (полного налива бобов). Работа выполнялась на основе методических указаний (Korsakov et al., 1979).

Биохимический состав семенного материала определяли в лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института сои (ВНИИ сои) многомерным методом БИК-анализа с использованием анализатора FOSS NIRSystems 5000 (G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, Дания). Принцип анализа основан на регистрации спектров отражения анализируемых проб в ближней инфракрасной области и сопоставлении связи между спектральными и референтными значениями. Обработку спектров и расчет белка и масла в семенах проводили по базовым градуировочным моделям с помощью программного обеспечения Vision 3.1. Расчет значений состава жирных кислот – пальмитиновой (C_{16}), стеариновой (C_{18}), олеиновой ($C_{18:1}$), линолевой ($C_{18:2}$), линоленовой ($C_{18:3}$) – и аминокислот (аргинин, лизин, тирозин, фенилаланин, гистидин, лейцин, изолейцин, метионин + цистин, валин, пролин, треонин, серин, аланин, глутаминовая и аспарагиновая кислоты) выполняли по градуировочным моделям, разработанных в 2009 г. в аналитической группе ВНИИ сои (Nizkii et al., 2020).

Для определения жирнокислотного состава в качестве эталонов применяли образцы семян, референтные показатели которых были получены методом газожидкостной хроматографии на приборе Sigma 2 (Perkin Elmer, США) с использованием металлической колонки размером 2 × 200 мм. Детектор пламенно-ионизационный, режим изотермический, температура – 187 °С, газ-носитель – азот, скорость потока – 10–15 мм/мин. Аминокислотный состав белка в градуировочных образцах определяли на жидкостном хроматографе (автоматический анализатор аминокислот фирмы LKB, Швеция) с использованием метода добавки: в ранее проанализированные пробы добавляли известное количество той или иной химически чистой аминокислоты, и ее содержание определяли по пропорциональности прироста площади пика на хроматограмме. Обработку результатов химического анализа осуществляли на основе подсчета средних значений показателей по данным трех параллельных определений.

Статистическую обработку данных выполняли по «Методике полевого опыта» (Dospekhov, 2012) в программе Excel for Windows. Существенность различий между выборками определяли с помощью НСР (наимень-

шая существенная разница), оценку достоверности различий проводили по t-критерию Стьюдента. Силу связей между признаками рассчитывали применяя парный корреляционный анализ с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel, Statistica 10.0 при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты

В результате работы по регенерации от 15 фертильных растений было получено 15 регенерантных линий сои (табл. 1).

ру клеток полевицы побегоносной (*Agrostis stolonifera* L.) (Gladkov, 2008). В связи с этим для оценки регенерационной способности семядольных узлов сои нами были взяты две концентрации ионов кадмия (5 мг/л и 10 мг/л).

Дальнейшее тестирование регенерантных линий сои продолжали в естественных природно-климатических условиях. Изучали показатели хозяйственно ценных признаков, выживаемости («сохранность растений к моменту уборки») и накопления запасных питательных элементов в семенах.

За трехлетний период изучения (2019–2021 гг.) в полевых условиях отмечена наибольшая урожайность у ли-

Таблица 1. Регенерантные линии сои, полученные с применением в питательных средах ионов тяжелых металлов как мутагенного фактора

Table 1. Regenerated soybean lines obtained through the use of heavy metal ions in nutrient media as a mutagenic factor

Регенерантные линии / Regenerated lines	Исходная фома / Original form	Ионы тяжлых металлов / Heavy metal ions	Концентрация ионов тяжелых металлов, мг/л / Concentration of heavy metal ions, mg/L
R 1	'Приморская 301'	–	–
R 1485	R1 (и. ф. 'Приморская 301')	Cu^{2+}	2
R 1490		Cu^{2+}	2
R 1584		Cd^{2+}	5
R 1568		Cd^{2+}	10
R 86	'Ходсон'	–	–
R 1585	R 86 (и. ф. 'Ходсон')	Cd^{2+}	5
R 1567		Cd^{2+}	10
R 1357	'Ходсон'	Cu^{2+}	2
R 1606		Cd^{2+}	5
R 1583	R 565 (и. ф. 'Ходсон')	Cd^{2+}	5
R 1590		Cd^{2+}	5
R 1605	'Приморская 81'	Cd^{2+}	5
R 1609		Cd^{2+}	5
R 1576	'Приморская 13'	Cd^{2+}	10

Эффективность регенерации оценивали исходя из числа регенерирующих эксплантов (семядольных узлов), то есть отношения между числом семядольных узлов, отозвавшихся на регенерацию, и общим числом семядольных узлов исходной формы; и регенерационной способности семядольных узлов (среднее число побегов на один узел). Данные показатели в вариантах питательных сред с ионами меди по отношению к контролю практически не имели изменений. В ранее полученных данных небольшая изменчивость показателей отмечена лишь в пределах исходных форм (Efremova, Fisenko, 2017).

Как известно, кадмий в питательной среде находится в более доступном состоянии, чем в почве. В работах Е. А. Гладкова концентрация кадмия 5 мг/л (в перерасчете на ионы) оказала ингибирующее действие на культу-

ний R 1490 (0,41 кг/м^2) и R 1606 (0,38 кг/м^2). По сравнению с исходными формами показатель первого образца был выше R 1 на 13,9%, второго – превышал 'Ходсон' на 35,7%. Образцы R 1584, R 1568, R 1590, полученные от исходных форм R 1 и R 565, характеризовались низким процентом сохранности растений к моменту уборки: показатель варьировал от 35 до 45%, что негативно отразилось на уровне урожайности (табл. 2). Показатель выживаемости «сохранность растений к моменту уборки» определяет адаптационную способность культуры при возделывании в конкретных погодных и эдафических условиях. Следует предположить, что для ряда тестируемых образцов условия были недостаточно благоприятными, о чем говорит относительно низкая сохранность растений во всех повторностях, которая в среднем за три года изучения у пяти регенерантных линий не превысила

Таблица 2. Хозяйственно значимые признаки регенерантных линий и исходных форм сои (среднее за 2019–2021 гг.), Приморский край

Table 2. Useful agronomic traits in regenerated soybean lines (average for 2019–2021), Primorsky Territory

Исходная форма, линия / Original form, line	Исходная форма / Original form	Урожайность, кг/м² / Yield, kg/m²	Масса 1000 семян, г / 1000 seed weight, g	Период вегетации, дни / Growing season, days	Сохранность растений к моменту уборки, % / Plant integrity by the time of harvesting, %
'Приморская 81'	–	0,41	180,8	119	88
R 1605	'Приморская 81'	0,33	145,9	115	94
R 1609		0,22	190,2	120	85
'Приморская 301'	–	0,27	145,0	119	63
R 1	'Приморская 301'	0,36	187,3	116	73
R 1485	R1 (и. ф. 'Приморская 301')	0,32	170,6	120	63
R 1490		0,41	150,5	113	86
R 1584		0,18	176,6	118	35
R 1568		0,18	200,0	117	40
'Приморская 13'	–	0,30	180,1	114	63
R 1576	'Приморская 13'	0,25	162,3	115	94
'Ходсон'	–	0,28	155,0	114	67
R 86	'Ходсон'	0,22	175,0	114	54
R 1585	R 86 (и. ф. 'Ходсон')	0,27	146,2	115	86
R 1567		0,23	146,3	114	71
R 1357	'Ходсон'	0,29	150,9	115	71
R 1606		0,38	140,8	113	76
R 1583	R 565 (и. ф. 'Ходсон')	0,25	160,6	114	69
R 1590		0,19	170,0	113	45
$НСР_{0,95}$		0,10	19,9	2,7	22,1

Примечание: $НСР_{0,95}$ – наименьшая существенная разность

Note: $НСР_{0.95}$ – the least significant difference

63,0%. Некоторые линии характеризовались более высоким процентом сохранности растений к моменту уборки в сравнении с их исходными формами.

Семена относительно крупного размера сформировались у регенерантных линий R 1568 (масса 1000 семян – 200,0 г) и R 1609 (190,2 г), превысивших значение своих исходных форм: R 1 на 12,7 г, 'Приморская 81' на 9,4 г. По периоду вегетации линии были близки к исходным формам. Некоторые образцы (R 1605, R 1, R 1490) сократили период созревания семян на четыре дня; продолжительность вегетационного периода растений составила 113–116 дней.

В опыте наблюдалась высокая чувствительность растений к инфицированию грибными патогенами (табл. 3). При воздействии возбудителя болезни *Septoria glycines* степень поражения листовой пластинки увеличилась на 51% в сравнении с ЕИФ (естественным инфекционным фоном) развития патогена. Меньшая степень поражения присутствовала у образцов R 1490 и R 1567 как в естественных условиях развития патогена (18% и 20%), так и искусственных (60%).

Согласно шкале для определения устойчивости сои к болезням (Korsakov et al., 1979), все регенерантные линии на естественном фоне развития *Cercospora sojina* проявили среднюю устойчивость к заболеванию. При принудительном инфицировании степень их поражения увеличилась примерно на 40%.

При анализе устойчивости к *Peronospora manshurica* в естественных условиях развития грибной инфекции поражение не превышало 35%, в искусственных оно было более 80%. При высокой инфекционной нагрузке образец R 1609 не смог в полной мере противостоять дополнительному прессингу патогена, степень поражения увеличилась от 20% (естественный фон) до 80% (искусственный). Среднеустойчивый образец R 1490 в меньшей степени поразился при инокуляции растений суспензией пероноспороза, поражение не превысило 50% (см. табл. 3).

Таблица 3. Степень поражения (%) листьев регенерантных линий сои и исходных форм грибными патогенами на фоне естественного инфекционного и искусственного заражения болезнью (среднее за 2019–2021 гг.), Приморский край

Table 3. The degree of damage (%) on the leaves of regenerated soybean lines and original forms, inflicted by fungal pathogens under natural and artificial infection pressure (average for 2019–2021), Primorsky Territory

Исходная форма, линия / Original form, line	Степень поражения грибными патогенами / Degrees of the damage inflicted by fungal pathogens					
	Septoria glycines Hemmi		*Cercospora sojina* Hara		*Peronospora manshurica* (Naum.) Syd.	
	ЕИФ / NIP	ИИФ / AIP	ЕИФ / NIP	ИИФ / AIP	ЕИФ / NIP	ИИФ / AIP
‘Приморская 81’	25	66	20	55	26	60
R 1605	30	70	23	58	33	63
R 1609	26	65	30	62	20	80
‘Приморская 301’	18	63	30	54	30	49
R 1	32	70	26	65	31	55
R 1485	20	70	25	54	35	56
R 1490	18	60	30	56	30	50
R 1584	23	60	23	63	20	65
R 1568	20	71	25	60	25	70
‘Приморская 13’	28	63	29	69	29	60
R 1576	26	60	21	55	23	59
‘Ходсон’	24	70	20	53	28	66
R 86	21	72	27	59	25	60
R 1585	23	63	26	66	20	59
R 1567	20	60	30	62	22	53
R 1357	25	62	33	50	26	60
R 1606	22	66	23	51	21	55
R 1583	19	68	28	60	22	70
R 1590	23	70	26	61	30	82
$НСР_{0,95}$	5,6	4,5	4,9	6,7	5,7	12,1

Примечание: ЕИФ – естественный инфекционный фон; ИИФ – искусственный инфекционный фон

Note: NIP – natural infection pressure; AIP – artificial infection pressure

Комплексную устойчивость ко всем грибным болезням на естественном фоне проявили линии R 1584, R 1568, R 1606, степень поражения не превышала 25%. На искусственном фоне заражения растений более низкой степенью восприимчивости к тестируемым патогенам характеризовалась линия R 1490.

При анализе химического состава семян в группе, полученной от сорта ‘Ходсон’, линии R 1590, R 1583 на 7,3–10,8% достоверно превосходили исходную форму по содержанию белка (табл. 4). Линия R 1583 за весь период исследований отличалась устойчиво высоким содержанием белка в семенах, с колебаниями по годам от 40,1 до 42,2%, что отмечалось нами в ранее полученных результатах (Kodirova et al., 2018).

В результате исследования комплекса аминокислот были определены заменимые, в том числе условно заменимые (гистидин и аргинин), и незаменимые аминокислоты. Сравнительный анализ показал слабую изменчивость (Cv < 10,5%) процентного содержания аминокислот от суммы аминокислот для большинства из них, в том числе заменимых, средние значения которых в белке регенерантных линий не превышали уровень исходных форм и составляли: аргинин – 4,4%, тирозин – 4,1%, аланин – 4,5%, пролин – 5,8%, серин – 5,3%, глутаминовая кислота – 14,7%, аспарагиновая кислота – 11,6%. Средней степенью изменчивости характеризовались гистидин и валин, коэффициент вариации по этим показателям составил 16,3% и 13,4% соответственно.

Таблица 4. **Характеристика регенерантных линий сои по содержанию белка и незаменимых аминокислот (среднее за 2019–2021 гг.), Амурская область**

Table 4. **Protein content and essential amino acids in regenerated soybean lines (average for 2019–2021), Amur Province**

Исходная форма, линия / Original form, line	Белок, % / Protein, %	Аминокислоты, % от суммы аминокислот / Individual amino acids, % of the total amino acid content							
		гистидин / histidine	валин / valine	лизин / lysine	лейцин / leucine	изолейцин / isoleucine	треонин / threonine	фенилаланин / phenylalanine	метионин + цистин / methionine + cystine
'Приморская 81'	40,0	7,9	7,3	6,2	7,9	5,6	3,6	4,3	1,8
R 1605	39,0	8,2	7,1	6,2	8,0	5,7	3,5	4,4	1,8
R 1609	38,7	7,0	7,0	6,2	8,0	5,6	3,6	4,2	1,7
'Приморская 301'	39,3	9,0	7,9	6,2	8,0	5,7	3,5	4,0	1,8
R 1	39,5	5,7	6,2	6,2	7,9	5,4	3,5	4,2	1,8
R 1485	38,3	7,2	7,1	6,2	8,0	5,6	3,5	4,4	1,8
R 1490	39,5	8,0	7,3	6,2	7,9	5,3	3,6	4,5	1,9
R 1584	38,8	7,5	7,3	6,2	8,0	5,6	3,6	4,4	1,8
R 1568	39,6	7,4	7,2	6,2	8,0	5,6	3,6	4,3	1,8
'Приморская 13'	39,9	7,4	6,2	6,1	7,6	5,6	3,5	4,2	1,5
R 1576	40,6	5,6	7,2	6,2	8,0	5,6	3,6	4,2	1,6
'Ходсон'	37,0	6,5	7,3	6,4	8,5	5,4	3,8	4,1	1,8
R 86	39,6	9,5	7,1	6,3	8,0	5,3	3,7	4,1	1,8
R 1585	38,4	8,7	7,3	6,2	8,0	5,5	3,6	4,3	2,1
R 1567	36,7	9,7	9,1	6,4	8,3	5,1	3,8	3,9	1,9
R 1357	38,4	8,5	8,8	6,3	8,0	5,4	3,7	4,4	2,1
R 1606	37,4	7,8	7,8	6,3	8,3	5,6	3,7	4,3	2,0
R 1583	41,0	8,6	7,0	6,2	7,9	5,5	3,6	4,3	2,0
R1590	39,7	7,9	7,8	6,3	8,1	5,5	3,7	4,2	1,9
Cv, %	3,7	16,3	13,4	1,2	2,3	2,8	2,6	3,5	10,5
$HCP_{0,95}$	1,8	1,3	1,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,2

Примечание: $HCP_{0,95}$ – наименьшая существенная разность, Cv – коэффициент вариации

Note: $HCP_{0.95}$ – the least significant difference, Cv – coefficient of variation

Вместе с тем по содержанию гистидина у некоторых регенерантных линий отмечались существенные отличия относительно их исходных форм, а по степени выраженности этого признака линии сорта 'Ходсон' на 21,5–49,2% достоверно превосходили уровень исходной формы. Кроме того, линии R 1357, R 1567, R 1585, R 1606, R 1583 характеризовались повышенным суммарным содержанием метионина с цистином и содержанием валина, значения которых достоверно превышали исходный сорт на 16,7 и 24,7%.

Все исследуемые образцы характеризовались относительно стабильной масличностью семян (18,1–20,8%). Только у одной линии (R 1609) содержание масла в семенах было достоверно выше, чем у исходной формы (табл. 5).

Линии R 1567, R 1357, R 1485 характеризовались максимальным содержанием масла в семенах (20,0–20,8%), но их значения не превышали достоверно уровень исходной формы.

При изучении качественного состава масла по содержанию насыщенных жирных кислот существенных отличий среди регенерантных линий не выявлено, по уровню изменчивости их можно условно отнести к группе стабильных (Cv < 10%). В среднем содержание пальмитино-

Таблица 5. **Количественный и качественный состав масла в образцах регенерантных линий сои (среднее за 2019–2021 гг.), Амурская область**

Table 5. **Quantitative and qualitative composition of oil in regenerated soybean lines (average for 2019-2021), Amur Province**

Исходная форма, линия / Original form, line	Масло, % / Oil, %	Содержание жирных кислот, % / Fatty acid content, %			$C_{18:2}/C_{18:1}$	$C_{18:2}/C_{18:3}$
		МНЖК / MUFA	ПНЖК / PUFA			
		олеиновая / oleic ($C_{18:1}$)	линолевая / linoleic ($C_{18:2}$)	линоленовая / linolenic ($C_{18:3}$)		
‘Приморская 81’	18,7	18,8	51,1	9,6	2,72	5,32
R 1605	19,8	19,2	51,4	8,8	2,68	5,84
R 1609	19,9	20,0	51,4	9,2	2,57	5,59
‘Приморская 301’	19,7	17,4	51,6	9,7	2,97	5,32
R 1	19,3	22,4	51,5	9,3	2,30	5,54
R 1485	20,0	19,7	51,3	9,1	2,60	5,64
R 1490	19,6	19,7	51,5	9,0	2,61	5,72
R 1584	19,9	19,8	51,5	8,6	2,60	5,99
R 1568	19,1	19,2	51,4	10,0	2,68	5,14
‘Приморская 13’	18,1	19,8	51,9	10,2	2,62	5,09
R 1576	18,9	21,4	51,4	9,4	2,40	5,47
‘Ходсон’	20,0	19,5	51,9	9,8	2,66	5,30
R 86	18,7	20,5	51,8	10,1	2,53	5,13
R 1585	19,4	16,6	50,9	7,6	3,07	6,70
R 1567	20,8	18,4	51,8	9,7	2,82	5,34
R 1357	20,2	16,5	52,1	8,2	3,16	6,35
R 1606	19,5	16,3	50,6	7,9	3,10	6,41
R 1583	18,5	18,3	51,6	10,0	2,82	5,16
R 1590	18,9	18,0	51,8	10,0	2,88	5,18
Cv, %	4,3	18,1	1,7	14,1	–	–
$НСР_{0,95}$	1,1	3,5	1,1	1,4	–	–

Примечание: МНЖК – мононенасыщенные жирные кислоты; ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты

Note: MUFA – monounsaturated fatty acids; PUFA – polyunsaturated fatty acids

вой кислоты в масле семян варьировало в пределах 9,6–10,0% при достоверном диапазоне различий 0,2–0,7%. Концентрация стеариновой кислоты была на уровне 3,4–3,9% при достоверном различии 0,04–0,15%.

В масле семян превалируют ненасыщенные жирные кислоты: олеиновая ($C_{18:1}$), линолевая ($C_{18:2}$) и линоленовая ($C_{18:3}$). Значительную часть от суммы всех жирных кислот занимает полиненасыщенная линолевая кислота. Ее содержание в масле изучаемых линий было стабильным. Средней вариабельностью характеризовались мононенасыщенная олеиновая (Cv = 18,1%) и полиненасыщенная линоленовая кислоты. Среди линий сортов ‘Приморская 81’, ‘Приморская 301’ и ‘Приморская 13’ отмечено несущественное повышение процентного содержания олеиновой кислоты. Во всех группах образцов изменение концентрации линоленовой кислоты было направлено в сторону снижения показателя. Наименьшее ее содержание выявлено в группе линий сорта ‘Ходсон’ (R 1585, R 1357, R 1606) с достоверным снижением средних значений на 15,5–28,9% относительно исходной формы.

Сравнительный анализ соотношений ненасыщенных жирных кислот в масле ($C_{18:2}/C_{18:1}$) показал, что у группы линий сорта ‘Ходсон’ с минимальным содержанием олеиновой кислоты в масле отношение к линолевой выше (2,82–3,16), чем у линий сортов ‘Приморская 81’, ‘Приморская 301’ и ‘Приморская 13’ (2,30–2,68), характеризующихся максимальным содержанием олеиновой кислоты. Такая взаимосвязь свидетельствует о различиях

между линиями и их исходными формами, что согласуется с ранее полученными результатами (Kodirova et al., 2019).

Соотношение полиненасыщенных жирных кислот $C_{18:2}/C_{18:3}$ в масле семян регенерантных линий находилось в пределах 5,1–6,7. Это свидетельствует о том, что масло исследуемых нами образцов сои имеет оптимальное соотношение жирных кислот, обеспечивающее необходимый баланс полиненасыщенных жирных кислот в организме человека.

Заключение

Таким образом, все наши данные показывают важность и актуальность проведения экспериментов по созданию регенерантных линий сои с применением в качестве мутагенного фактора ионов тяжелых металлов (Cu^{2+}, Cd^{2+}). Оценка созданных линий по основным хозяйственно ценным признакам, качественным характеристикам семян и устойчивости к грибным заболеваниям показала возможность использования ионов тяжелых металлов для увеличения генетического разнообразия культуры.

При тестировании исследуемого материала в естественных природно-климатических условиях наибольшая урожайность была отмечена у регенерантных линий R 1490 (0,41 кг/м^2) и R 1606 (0,38 кг/м^2); она превышала показатели исходных форм на 13,9% и 35,7% соответственно. У линий R 1605, R 1, R 1490 наблюдалось сокращение сроков созревания на три-четыре дня по сравнению с исходными образцами. Кроме того, была выявлена высокая поражаемость растений регенерантных линий при инфицировании патогенами *Septoria glycines*, *Hemmi* и *Peronospora manshurica*. Установлена относительная комплексная устойчивость к грибным болезням (септориоз, церкоспороз, пероноспороз): на естественном фоне – у линий R 1584, R 1568, R 1606, на искусственном инфекционном фоне – у R 1490. Определены различия между линиями и исходными сортами по биохимическому составу семян. Выделена группа линий сорта 'Ходсон' с достоверным превышением по содержанию белка (R 1590, R 1583), гистидина (R 1490, R 1357, R 1567, R 1585, R 1606, R 1583), валина (R 1357, R 1567), метионина + цистина (R 1585, R 1606, R 1583, R 1357). По содержанию масла в семенном материале существенно превышали уровень исходного сорта линии R 1605 и R 1609. Отмечены изменения во всех группах линий относительно их исходных форм по соотношению ненасыщенных жирных кислот $C_{18:2}/C_{18:1}$.

По результатам опытов выделены регенерантные линии сои, представляющие интерес для использования в селекционном процессе.

References / Литература

Assefa Y., Bajjalieh N., Archontoulis S., Casteel S., Davidson D., Kovács P., et al. Spatial characterization of soybean yield and quality (amino acids oil, and protein) for United States. *Scientific Reports*. 2018;8(1):14653. DOI: 10.1038/s41598-018-32895-0

Belimov A.A., Tihonovich I.A. Microbiological aspects of resistance and accumulation of heavy metals in plants. *Agricultural Biology*. 2011;46(3):10-15. [in Russian] (Белимов А.А., Тихонович И.А. Микробиологические аспекты устойчивости и аккумуляции тяжелых металлов у растений. *Сельскохозяйственная биология*. 2011;46(3):10-15).

Buchanan B.B., Gruissem W., Jones R.L. (eds). Biochemistry and molecular biology of plants. 2nd ed. Chichester: Wiley Blackwell; 2015.

Butovets E.S., Vasina E.A., Luk'yanchuk L.M. Screening of soybean germplasm under conditions of the Primorsky territory. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2020;34(8):23-27. [in Russian] (Бутовец Е.С., Васина Е.А., Лукьянчук Л.М. Скрининг гермоплазмы сои в условиях Приморского края. *Достижения науки и техники АПК*. 2020;34(8):23-27). DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10803

Chaika A.K., Tilba V.A., Moiseenko A.A., Vashchenko A.P. Sinegovskaya V.T., Emelyanov A.N., Kraskovskaya N.A., Gubin A.V., Nikishin V.M., Fomenko N.D., Gaiduchenko A.N., Mashchenko N.V., Chaika N.V., Kapustin Yu.S., Stupin V.M., Morokhovets V.N. Adaptive and innovative technologies for cultivation of soybean and maize in the Russian Far East: guidelines. (Adaptivnye i progressivnye tekhnologii vozdelyvaniya soi i kukuruzy na Dalnem Vostoke: metod. rekomendatsii). Vladivostok: Dalnauka; 2009. [in Russian] (Чайка А.К., Тильба В.А., Моисеенко А.А., Ващенко А.П., Синеговская В.Т., Емельянов А.Н., Красковская Н.А., Губин А.В., Никишин В.М., Фоменко Н.Д., Гайдученко А.Н., Мащенко Н.В., Чайка Н.В., Капустин Ю.С., Ступин В.М., Мороховец В.Н. Адаптивные и прогрессивные технологии возделывания сои и кукурузы на Дальнем Востоке: метод. рекомендации. Владивосток: Дальнаука; 2009).

Dega L.A., Butovets E.S., Lukyanchuk L.M. Soybean: diseases and pests (Soya: bolezni i vrediteli). Moscow: Izvestiya; 2022. [in Russian] (Дега Л.А., Бутовец Е.С., Лукьянчук Л.М. Соя: болезни и вредители. Москва: Известия; 2022).

Dospekhov B.A. Methodology of field trial with fundamentals of statistical processing of research results (Metodika polevogo opyta s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy). Moscow: Kniga po trebovaniyu; 2012. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. Москва: Книга по требованию; 2012).

Dyomin A.A., Tsmokaljuk N.M., Sydakov V.V., Borisova G.Ja. Influence of pollution of ground TM on economic useful parameters of a soya in conditions of Ussuriyskogo area of Primorski Krai. *Izvestia MAAO = News of the International Academy of Agrarian Education*. 2007;(5):15-22. [in Russian] (Дёмин А.А., Цмокалюк Н.М., Судаков В.В., Борисова Г.Я. Влияние загрязнения почвы ТМ на хозяйственно полезные показатели сои в условиях Уссурийского района Приморского края. *Известия Международной академии аграрного образования*. 2007;(5):15-22).

Efremova O.S., Fisenko P.V. Effect of mutagenic action of copper ions upon the level of genetic variability of soybean regenerants. *Far East Agrarian Bulletin*. 2017;4(44):30-36. [in Russian] (Ефремова О.С., Фисенко П.В. Влияние мутагенного действия ионов меди на уровень генетической изменчивости регенерантов сои. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2017;4(44):30-36).

Gladkov E.A. Biotechnological methods of obtaining of *Agrostis stolonifera* plants resistant to Cd and Pb. *Agricultural Biology*. 2008;43(3):83-87. [in Russian] (Гладков Е.А. Биотехнологические методы получения растений полевицы побегоносной *Agrostis stolonifera*, обладающих устойчивостью к кадмию и свинцу. *Сельскохозяйственная биология*. 2008;43(3):83-87).

Kipshakbayeva G.A., Tleulina Z.T., Oshergina I.P., Amantaev B.O., Sarbasova N.A. Influence of conditions of cultivation of soybean varieties of various origin on the for-

mation of productivity and quality indicators. *Gylym zhane Bilim = Science and Education*. 2022;2-1(67):213-222. [in Russian] (Кипшакбаева Г.А., Тлеулина З.Т., Ошергина И.П., Амантаев Б.О., Сарбасова Н.А. Влияние условий возделывания сортов сои различного происхождения на формирование показателей продуктивности и качества. *Наука и образование*. 2022;2-1(67):213-222). DOI: 10.56339/2305-9397-2022-1-2-213-223

Kodirova G.A., Kubankova G.V., Efremova O.S. Biochemical assessment of somaclonal lines of soybean resistant to ions of cadmium. *Far East Agrarian Bulletin*. 2018;3(47):37-42. [in Russian] (Кодирова Г.А., Кубанкова Г.В., Ефремова О.С. Биохимическая оценка сомаклональных линий, резистентных к ионам кадмия. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2018;3(47):37-42). DOI: 10.24411/1999-6837-2018-13055

Kodirova G.A., Kubankova G.V., Efremova O.S., Fisenko P.V. Variability of the fatty acid composition of oil in the seeds of somaclonal soybean lines. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2019;3(51):38-44. [in Russian] (Кодирова Г.А., Кубанкова Г.В., Ефремова О.С., Фисенко П.В. Изменчивость жирнокислотного состава масла в семенах сомаклональных линий сои. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2019;3(51):38-44). DOI: 10.24411/1999-6837-2019-13033

Korotchenko I.S. Heavy metal influence on the photosynthetic pigment availability in carrot leaves. *The Bulletin of KrasGAU*. 2011;4(55):86-91. [in Russian] (Коротченко И.С. Влияние тяжелых металлов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях моркови. *Вестник КрасГАУ*. 2011;4(55):86-91).

Korsakov N.I., Ovchinikova A.M., Mizeva V.M. (comp.). Guidelines for studying soybean resistance to fungal diseases (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu ustoychivosti soi k gribnym boleznyam). Leningrad: VIR; 1979. [in Russian] (Методические указания по изучению устойчивости сои к грибным болезням / сост. Н.И. Корсаков, А.М. Овчиникова, В.М. Мизева. Ленинград: ВИР; 1979).

Koshkin E.I. Physiology of crop resistance (Fiziologiya ustoychivosti selskokhozyaystvennykh kultur). Moscow: Drofa; 2010. [in Russian] (Кошкин Е.И. Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур. Москва: Дрофа; 2010).

Kulaeva O.A, Tsyganov V.E. Molecular-genetic basis of cadmium tolerance and accumulation in higher plants. *Russian Journal of Genetics: Applied Research*. 2011;1(5):349-360. DOI: 10.1134/S2079059711050108

Li M., Liu Y., Wang C., Yang X., Li D., Zhang X. et al. Identification of traits contributing to high and stable yields in different soybean varieties across three Chinese latitudes. *Frontiers in Plant Science*. 2020;10:1642. DOI: 10.3389/fpls.2019.01642

Murashige T., Skoog F.A. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

Nizkii S., Kodirova G., Kubankova G. Determining the amino acid composition of soybean proteins using IR scanners. *International Journal of Pharmaceutical Research and Allied Sciences*. 2020;9(2):45-49.

Petibskaya V.S. Soybean: chemical composition and uses (Soya: khimicheskiy sostav i ispolzovaniye). Maikop: Poligraf-Yug; 2012. [in Russian] (Петибская В.С. Соя: химический состав и использование. Майкоп: Полиграф-ЮГ; 2012).

Reutova N.V. Mutagenic potential of some heavy metals. *Russian Journal of Genetics: Applied Research*. 2017;7(2):175-179. DOI: 10.1134/S2079059717020101

Rozhanskaya O.A., Lomova T.G., Shilova T.V., Gorshkova E.M. New somaclonal lines of soybean to be bred in Siberia. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2016;2:35-42. [in Russian] (Рожанская О.А., Ломова Т.Г., Шилова Т.В., Горшкова Е.М. Новые сомаклональные линии сои для селекции в Сибири. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2016;(2):35-42).

Shahova M.N., Butova S.V., Vorontsov V.V. Development of a technology for obtaining a protein-lipid complex from soybean seeds. *Tekhnologii i tovarovedeniye selskokhozyaystvennoy produktsii = Technologies and Merchandising of Agricultural Products*. 2023;2(21):65-73. [in Russian] (Шахова М.Н., Бутова С.В., Воронцов В.В. Разработка технологии получения белково-липидного комплекса из семян сои. *Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции*. 2023;2(21):65-73). DOI: 10.53914/issn2311-6870_2023_2_65

Tessari P., Lante A., Mosca G. Essential amino acids: master regulators of nutrition and environmental footprint? *Scientific Reports.* 2016;6:26074. DOI: 10.1038/srep26074

Tsmokalyuk N.M., Sudakov V.V. The effect of soil contamination with heavy metals on the development and productivity of soybean progeny (Vliyaniye zagryazneniya pochvy tyazhelymi metallami na razvitiye i produktivnost potomstva soi). In: *World Agriculture: Current State, Urgent Problems, and Development Trends: Proceedings of the International Symposium Dedicated to the Fifty-Year Anniversary of Primorsky State Agricultural Academy* (*Mirovoye selskoye khozyaystvo: sovremennoye sostoyaniye, aktualnye problemy i tendentsii razvitiya: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma, posvyashchennogo pyatidesyatiletiyu FGBOU VO "Primorskaya gosudarstvennaya selskokhozyaystvennaya akademiya")*. Ussuriysk; 2008. p.108-116. [in Russian] (Цмокалюк Н.М., Судаков В.В. Влияние загрязнения почвы тяжелыми металлами на развитие и продуктивность потомства сои. В кн.: *Мировое сельское хозяйство: современное состояние, актуальные проблемы и тенденции развития: материалы международного симпозиума, посвященного пятидесятилетию ФГБОУ ВО «Приморская государственная сельскохозяйственная академия»*. Уссурийск; 2008. С.108-116).

Tsyganov V.E., Zhernakov A.I., Kulaeva O.A., Tsyganova A.V., Balushka F., Noh M., Ellis N., Tikhonovich I.A. Genetic and structural analysis of common pea resistance to toxic concentrations of cadmium (Geneticheskiy i strukturny analiz ustoychivosti gorokha posevnogo k toksichnym kontsentratsiyam kadmiya). In: *Fundamental and Applied Problems of Botany in the Beginning of the 21st Century: Proceedings of the All-Russian Conference (Petrozavodsk, September 22–27, 2008). Part 6. Environmental Physiology and Biochemistry of Plants. Plant Introduction* (*Fundamentalnye i prikladnye problemy botaniki v nachale XXI veka: materialy vserossiyskoy konferentsii (Petrozavodsk, 22–27 sentyabrya 2008 g. Chast 6: Ekologicheskaya fiziologiya i biokhimiya rasteniy. Introduktsiya rasteniy).* Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the RAS; 2008. p.140-142. [in Russian] (Цыганов В.Е., Жернаков А.И., Кулаева О.А., Цыганова А.В., Балушка Ф., Нох М., Эллис Н., Тихонович И.А. Генетический и структурный анализ устойчивости гороха посевного к токсичным концентрациям кадмия. В кн.: *Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века: материалы всероссийской конференции (Петрозаводск, 22–27 сентября 2008 г. Часть 6: Экологическая физиология и биохимия растений. Интродукция растений.* Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2008. С.140-

142). URL: http://resources.krc.karelia.ru/geobotany/doc/botany2008/Botanika6.pdf [дата обращения: 12.09.2023].

Usanova Z.I. Methodology for carrying out scientific research and coursework on crop production: a tutorial (Metodika vypolneniya nauchnykh issledovaniy i kursovoy raboty po rastenievodstvu: uchebnoye posobiye). 3rd ed. Tver: Tver State Agricultural Academy; 2017. [in Russian] (Усанова З.И. Методика выполнения научных исследований и курсовой работы по растениеводству: учебное пособие. 3-е изд. Тверь: Тверская ГСХА; 2017).

Vashchenko A.P., Mudrik N.V., Fisenko P.P., Dega L.A., Chaika N.V., Kapustin Yu.S. Soybean in the Russian Far East (Soya na Dalnem Vostoke). Vladivostok: Dalnauka; 2014. [in Russian] (Ващенко А.П., Мудрик Н.В., Фисенко П.П., Дега Л.А., Чайка Н.В., Капустин Ю.С. Соя на Дальнем Востоке. Владивосток: Дальнаука; 2014).

Информация об авторах

Екатерина Сергеевна Бутовец, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией, Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, otdelsoy@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2879-3570

Людмила Михайловна Лукьянчук, научный сотрудник, Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, otdelsoy@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7584-4652

Галина Александровна Кодирова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр Всероссийский научно-исследовательский институт сои, 675027 Россия, Благовещенск, Игнатьевское ш., 19, kga@vniisoi.ru, https://orcid.org/0000-0002-2414-5699

Галина Викторовна Кубанкова, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр Всероссийский научно-исследовательский институт сои, 675027 Россия, Благовещенск, Игнатьевское ш., 19, kgv@vniisoi.ru, https://orcid.org/0000-0001-6074-902X

Ольга Сергеевна Ефремова, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, efremo.olga2010@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9212-2117

Information about the authors

Ekaterina S. Butovets, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Laboratory, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, 30 Volozhenina St., Timiryazevsky Settlem., Ussuriysk 692539, Russia, otdelsoy@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2879-3570

Lyudmila M. Lukyanchuk, Researcher, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, 30 Volozhenina St., Timiryazevsky Settlem., Ussuriysk 692539, Russia, otdelsoy@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7584-4652

Galina A. Kodirova, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, All-Russian Research Institute of Soybean, 19 Ignatievskoye Hwy., Blagoveshchensk 675027, Russia, kga@vniisoi.ru, https://orcid.org/0000-0002-2414-5699

Galina V. Kubankova, Senior Researcher, All-Russian Research Institute of Soybean, 19 Ignatievskoye Hwy., Blagoveshchensk 675027, Russia, kgv@vniisoi.ru, https://orcid.org/0000-0001-6074-902X

Olga S. Efremova, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, efremo.olga2010@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9212-2117

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 01.04.2024; принята к публикации 05.06.2024.
The article was submitted on 01.11.2023; approved after reviewing on 01.04.2024; accepted for publication on 05.06.2024.