

Генетические ресурсы риса (*Oryza sativa* L.) с окрашенным перикарпом зерна

О.В. Зеленская¹, Г.Л. Зеленский^{1,2}✉, Н.В. Остапенко², Н.Г. Туманьян²

¹ Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт риса, Краснодар, Россия

Рис посевной (*Oryza sativa* L.) обеспечивает питание более половины населения Земли. Традиционно он считается азиатской культурой, но возделывается также в Африке, Америке, Австралии и Южной Европе. Основные площади посева риса в странах мира занимают белозерные сорта. Дикорастущие предки культурного риса имели окрашенный перикарп зерна. В странах традиционного рисоводства наряду с белозерными сортами выращивают краснозерный и чернозерный рис для использования в качестве диетического и лечебного продукта. Его употребляют в пищу без предварительного шлифования крупы, поэтому сохраняются все питательные и биологически активные вещества, которыми ценится эта культура. Рис с окрашенным перикарпом зерна обладает более высокой антиоксидантной активностью, чем белозерный. В обзоре представлены данные о содержании в сортах краснозерного и чернозерного риса антиоксидантных соединений: фенольных кислот, флавоноидов, γ -оризанола, антоцианов, проантоцианидинов и др. С учетом полезных свойств растений риса с окрашенным перикарпом зерна в ведущих рисосеющих странах Азии проводится селекционная работа по созданию современных пигментированных сортов. В европейских странах – Италии и Франции – на основе азиатских сортов созданы также краснозерные и чернозерные сорта риса с высоким содержанием фитохимических элементов. С 2001 г. селекция сортов риса с окрашенным перикарпом зерна начата в Российской Федерации. Созданы сорта риса: краснозерные – Марс и Рубин (2012 г.) и чернозерный глютинозный – Южная ночь (2014 г.), которые включены в Государственный реестр охраняемых селекционных достижений. У этих сортов выявлено большое количество олеиновой и линоленовой кислот (до 43 % каждой), тогда как у белозерного сорта риса Рипан обнаружены только их следы. Установлены значительные отличия по содержанию антиоксидантов: Рипан – 7, Марс и Рубин – по 45, Южная ночь – 105 мг/100 г продукта. Эти сорта внедрены в производство и используются для диетического питания и в качестве исходного материала для создания новых эксклюзивных сортов риса.

Ключевые слова: краснозерный рис; чернозерный рис; сорта риса; гибридизация; селекция; антиоксиданты; антоцианы; проантоцианидины; пищевая ценность.

КАК ЦИТИРОВАТЬ ЭТУ СТАТЬЮ:

Зеленская О.В., Зеленский Г.Л., Остапенко Н.В., Туманьян Н.Г. Генетические ресурсы риса (*Oryza sativa* L.) с окрашенным перикарпом зерна. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018;22(3):296-303. DOI 10.18699/VJ18.363

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Zelenskaya O.V., Zelensky G.L., Ostapenko N.V., Tumanyan N.G. Genetic resources of rice (*Oryza sativa* L.) with colored pericarp. Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018; 22(3):296-303. DOI 10.18699/VJ18.363 (in Russian)

УДК 633.181: 57.082.263

Поступила в редакцию 08.05.2017

Принята к публикации 19.02.2018

© АВТОРЫ, 2018

✉ e-mail: zelensky08@mail.ru

Genetic resources of rice (*Oryza sativa* L.) with colored pericarp

O.V. Zelenskaya¹, G.L. Zelensky^{1,2}✉, N.V. Ostapenko², N.G. Tumanyan²

¹ Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

² All-Russian Rice Research Institute, Krasnodar, Russia

The rice plant (*Oryza sativa* L.) provides nutrition for more than half the world's population. Traditionally it is considered an Asian crop, but it is also cultivated in Africa, America, Australia and Southern Europe. The main areas of rice growing in the world are occupied with the white-grained varieties. Wild-growing ancestors of cultural rice had a colored grain pericarp. In the countries of traditional rice growing, along with white-grained varieties, red and black grain rice varieties are grown as a dietary and therapeutic product. It is used for food without preliminary grinding of the grains, therefore all nutrients and biologically active substances this culture is valued for are preserved. Rice with the colored grain pericarp has a higher antioxidant activity than white-grained. The review presents data on the content of antioxidant compounds in the varieties of the red- and black-grained rice: phenolic acids, flavonoids, γ -oryzanol, anthocyanins, proanthocyanidins, etc. Aiming at these useful properties of rice plants with a colored grain pericarp, the leading rice-growing countries work on breeding of the modern pigmented rice varieties. In European countries, Italy and France, the red and black grain varieties of rice with a high content of phytochemical elements have also been bred based on Asian varieties. Breeding of rice varieties with colored grain pericarp was started in the Russian Federation in 2001. As a result, the following rice varieties were developed: red-grained Mars and Rubin (2012), as well as the black-grained glutinous variety Yuzhnaya Noch (2014), which are included in the RF State Register of Protected Breeding Achievements. These varieties have been revealed to contain a large amount of oleic and linolenic acids (up to 43 % each), whereas only their traces are found in the white-grained rice variety Rapan. There are significant differences in the content of antioxidants: Rapan has 7 mg/100 g; Mars and Rubin, 45 mg/100 g; Yuzhnaya Noch, 105 mg/100 g. These varieties have been introduced into commercial production and are used for dietary nutrition and as a starting material for the creation of new exclusive varieties of rice.

Key words: red rice; black rice; rice varieties; hybridization; breeding; antioxidants; anthocyanins; proanthocyanidins; nutritional value.

Широкое использование генофонда растений Н.И. Вавилов рассматривал как генетическую основу селекции растений. Он считал, что в селекционную работу необходимо включать все ботаническое разнообразие, известное для каждой культуры (Вавилов, 1987). Рис – одна из наиболее распространенных на земном шаре культур. Рисовая крупа является основным продуктом питания более чем 3 млрд человек. Поэтому сбор генетических ресурсов риса для использования в селекции активно ведется во всех рисосеющих странах мира.

Рис посевной (*Oryza sativa* L.) – это совокупность форм, которые возникли в результате многовекового введения в культуру дикорастущего риса, имеющего окрашенный перикарп зерновки. Вовлечение в селекционный процесс различных разновидностей риса необходимо для увеличения генетического разнообразия исходного материала. Подавляющее большинство возделываемых в мире сортов риса – белозерные. До 2008 г. в Российской Федерации выращивали только белозерные сорта риса. Согласно принятому в Российской Федерации ГОСТу (2002), содержание окрашенных зерновок в зерне риса высшего класса I и II типов допускается не более 2 %, иначе партия считается некондиционной. В странах Евросоюза принят еще более жесткий регламент для белозерных сортов риса. Еврокомиссия установила стандарт качества зерна риса (Council Regulation № 1785/2003 от 29.09.2003), согласно которому содержание красных зерен не должно превышать 1 %. Это требование введено потому, что распространение растений красnozерного риса на полях приводило к снижению качества урожая. Такой рис повсеместно уничтожался как сорняк и в качестве генетического ресурса, как правило, не рассматривался. Но, несмотря на то что селекционные исследования и возделывание риса с окрашенным зерном в западных странах были ограничены, традиционные сорта риса с пигментированной зерновкой выращивали и употребляли как здоровую пищу в азиатских странах (Китай, Япония, Индия, Шри-Ланка, Филиппины и др.). Например, в Бутане 30 % площади посева риса занимают сорта с окрашенным перикарпом зерна (Ahuja et al., 2007). Жители Шри-Ланка с давних пор считали, что традиционные сорта риса (в основном красnozерные) обладают превосходными питательными свойствами и имеют лечебный эффект благодаря наличию в зерне этих сортов фитохимических веществ, в основном фенольных соединений (Gunaratne et al., 2013).

В Ираке, Индии, Китае, Таиланде, Мексике, Пакистане, Узбекистане и на Филиппинах сорта с окрашенным перикарпом зерна используют для приготовления экзотических блюд. Широкую известность в мире получила, например, каша из черного глютинозного риса, имеющая темно-пурпурный цвет и специфический запах (Rice recipes..., 2005). В ряде азиатских стран (Вьетнам, Мьянма и др.) и странах Западной Африки глютинозный рис с окрашенным перикарпом зерна используют в церемониальных и религиозных ритуалах (Ahuja et al., 2007; Rice Almanac, 2013).

Чернозерный рис известен в мире как «запрещенный», или императорский. Его употребляли в пищу в Китае только семья императора, считалось, что этот рис увеличивает продолжительность жизни (Zhang et al., 2015; Kushwaha,

2016). Обычным людям не позволялось использовать чернозерный рис. В настоящее время он широко доступен потребителям в разных частях мира, несмотря на то, что его происхождение не до конца изучено (Oikawa et al., 2015). Этот рис отличается высокой антиоксидантной активностью из-за присутствия в перикарпе пигмента антоциана, фенольных кислот, витамина Е, фитиновой кислоты (Kong, Lee, 2010; Zhang et al., 2010).

Рис с черной или пурпурной окраской перикарпа предотвращает развитие диабета и атеросклероза, он обладает противовоспалительным и противоотечным действием, снижает риск сердечных приступов, аллергии и ожирения, уменьшает рост раковых опухолей, улучшает работу пищеварительной системы. Кроме того, он способствует удалению из организма свободных радикалов. Это имеет важное значение как фактор защиты организма от канцерогенов (Pereira-Caro et al., 2013b; Bordiga et al., 2014; Kushwaha, 2016).

Окраска зерновки риса обусловлена наличием и различным соотношением пигментов, содержащихся в перикарпе, семенной оболочке и алейроновом слое (Dong et al., 2008; Chen et al., 2012; Maeda et al., 2014). Образцы, имеющие цветной эндосперм, в генетических ресурсах риса до недавнего времени не были известны. Однако китайскими учеными предприняты попытки получить рис с фиолетовым эндоспермом при помощи методов геной инженерии путем введения в растения риса восьми генов (два регуляторных гена из кукурузы и шесть структурных – из колеуса) с эндосперм-специфичными промоторами. В результате был получен новый образец риса Purple Endosperm Rice с высокой антиоксидантной активностью благодаря содержанию антоцианов в эндосперме (Zhu et al., 2017). Все остальные известные в мире пигментированные сорта и селекционные образцы риса имеют окрашенный перикарп зерна, который обычно удаляется в процессе шлифования зерна риса при обработке в крупу, но именно нешлифованный рис востребован потребителями из-за его ценных целебных свойств.

Установлено, что окраска перикарпа зерновки риса контролируется доминантными генами: *Prp* – Purple pericarp, *Rc* – Brown pericarp, *Rd* – Red pericarp. Рецессивные аллели *prp*, *rcp* и *rdp*, а также гены-ингибиторы доминантных генов, подавляющие окрашивание перикарпа, обуславливают белую окраску зерна (Sweeney et al., 2006). Известно, что гены *Rc* и *Rd* локализованы в хромосомах 7 и 1 соответственно; при этом *Rd* является структурным геном, кодирующим фермент DFR, необходимый для синтеза проантоцианидинов и антоцианов, а *Rc* кодирует транскрипционный MYC-подобный фактор с доменом bHLH, необходимый для активации структурных генов (Furukawa et al., 2007; Dong et al., 2008).

Согласно данным классической генетики, черная окраска перикарпа контролируется двумя комплементарными доминантными генами: Purple pericarp B (*Pb*), локализованным в хромосоме 4, и Purple pericarp A (*Pp*), локализованным в хромосоме 1 (Rahman et al., 2013). Было высказано предположение о наличии еще одного гена (*P*), контролирующего черную окраску перикарпа зерна риса и локализованного в хромосоме 3 (Maeda et al., 2014). Ген *Pb* (синоним *Ra*) риса был картирован и клонирован.

Установлено, что он кодирует транскрипционный MYC-подобный фактор с доменом bHLH, необходимый для активации биосинтеза антоцианов (Hu et al., 1996; Wang, Shu, 2007). Локус *A*, как выяснилось, идентичен локусу *Rd* и кодирует фермент DFR (Furukawa et al., 2007). Ген *P* в хромосоме 3 кодирует MYB-подобный транскрипционный фактор, который, взаимодействуя с *Pb*, образует комплекс, активирующий гены биосинтеза антоцианов в зерновке риса (Maeda et al., 2014).

Пигментированный рис, как известно, обладает более высокой антиоксидантной активностью, чем белозерный. Исследование антиоксидантного потенциала, содержания фенольных соединений, антоцианов, α -токоферола и γ -оризанола в зерне риса с окрашенным перикарпом зерна в сравнении с белозерным рисом показало, что экстракты окрашенного риса отличаются повышенной антиоксидантной активностью. Среди антиоксидантных соединений красnozерного риса были выявлены фенольные кислоты (преобладала феруловая кислота), флавоноиды, производные витамина E, γ -оризанол и проантоцианидины (Goufo, Trindade, 2014; Shao et al., 2015). Кроме того, черnozерный рис содержит антоцианы, обуславливающие окраску перикарпа зерна. По сравнению с красnozерным и белозерным рисом у него обнаружено повышенное содержание галловой, гидроксibenзойной и протокатехиновой кислот (Laokuldilok et al., 2011; Chen et al., 2012).

При анализе красnozерных образцов риса азиатского происхождения подтверждено наличие в них феруловой, сириновой и п-кумаровой кислот, а также впервые обнаружена м-кумаровая кислота (Sumczynski et al., 2016). Изучение 223 сортов и сортообразцов корейского риса выявило различия в содержании в их составе октакозанола от 0.78 до 6.06 мг/100 г, причем 90 % изученных образцов были красnozерными. 13 генотипов и селекционных образцов с окрашенным перикарпом имели высокое содержание – свыше 4 мг/100 г – октакозанола, который является антиоксидантом, источником витамина E и сжигателем жира (Cho et al., 2017).

Большинство селекционных программ в мире направлено на создание белозерных сортов риса. Но развивающееся в последнее время стремление населения употреблять продукты питания, снижающие риск развития различных заболеваний и способствующие долголетию, привело к новому направлению в селекции риса – созданию эксклюзивных сортов с окрашенным перикарпом зерна. В скрещивания были вовлечены известные красnozерные и черnozерные традиционные азиатские сорта риса, и теперь многие рисолюбивые страны, в том числе европейские, возделывают сорта с окрашенным перикарпом зерна местной селекции (Angelini et al., 2008; Bordiga et al., 2014).

При создании исходного материала для выведения сортов риса с пигментированной зерновкой было необходимо решить ряд проблем. Как известно, большинство красnozерных образцов риса склонно к полеганию и осыпанию колосков (Зеленская, 2015; Ziska et al., 2015). Традиционные черnozерные сорта имеют мелкое зерно и более низкую урожайность по сравнению с белозерными. Поэтому при создании новых сортов риса селекционеры стремились преодолеть эти недостатки, скрещивая образцы риса с окрашенным перикарпом зерна и белозерные

сорта с высокими показателями хозяйственно ценных признаков (Maeda et al., 2014; Zhang et al., 2015; Рысбекова и др., 2017).

Наиболее известны в мире сортообразцы риса с пигментированной зерновкой из Китая. Согласно литературным данным, посеvy риса с окрашенным перикарпом зерна ежегодно занимают здесь около 0.4 млн га, что составляет 1.26 % общей посевной площади (Chaudhary, Tran, 2001). Посевы красnozерного риса в основном сосредоточены на юго-западе и востоке страны в долине реки Янцзы. В этих районах преимущественно выращивается красnozерный рис, относящийся к подвиду *indica*. По данным Национального банка зерновых генетических ресурсов в Пекине, из 31 663 образцов генплазмы риса Китая 7177 (20.71 %) были красnozерными. Из них 6615 образцов относились к подвиду *indica*, 8 – к подвиду *japonica*, а 554 были глютинозными (Ahuja et al., 2007).

Кроме стародавних красnozерных сортов риса, в Китае возделываются и новые сорта, отвечающие требованиям современного производства. Так, красnozерный ароматический сорт Hong Xiang 1, полученный в 1997 г. при скрещивании сортов IR 24 и Changxiangdao, обладает высокой урожайностью (6.75 т/га), крупным зерном и устойчивостью к пирикулярриозу (Tang, Wang, 2001). Последнее очень важно, так как большинство красnozерных образцов риса, как правило, поражается болезнями, в том числе и пирикулярриозом (Saka et al., 2007; Зеленская, 2015). Сорт Hong Xiang 1 впоследствии был использован селекционерами для получения шести инбредных линий, созданных для генетического обособления процессов биосинтеза проантоцианидинов (Xu et al., 2017). Изучение гибридной популяции, полученной при скрещивании белозерного китайского сорта П-32В и черnozерного Yunnanheixiannuo, показало расщепление по цвету перикарпа зерна: черное, светло-пурпурное и белое. В результате было отобрано 15 новых высокоурожайных линий с различным содержанием фенольных соединений и высокой антиоксидантной активностью (Zhang et al., 2015). На основе изучения содержания фитохимических веществ 14 возделываемых в Китае красnozерных сортов риса предложено использовать косвенный отбор по признаку общего содержания фенолов для создания новых сортов с высокой антиоксидантной активностью (Shao et al., 2015).

Востребованы китайские эксклюзивные сорта риса и в других странах. Например, сорт Jingu 96 с черной окраской перикарпа зерна выращивали в полевых условиях в Египте в 2010–2013 гг. и получили урожай в среднем 6.85 т/га. Сорт отличался хорошим качеством зерна с высоким содержанием амилозы (20.3 %) и протеина (10.48 %) (Metwally et al., 2014).

Не менее известны в мировом рисоводстве и японские сорта риса с окрашенным перикарпом зерна. Так, сорт Asamurasaki, зарегистрированный в 1996 г., получен из гибридной комбинации японского глютинозного риса и черnozерного образца Bali black rice. У этого сорта выявлено суммарно 23 метаболита, в том числе антоцианы, флавоны, флавонолы, каротиноиды и γ -оризанола. Экстракты из такого пигментированного риса используют в пищевой промышленности в качестве натурального красителя при хлебопечении и изготовлении йогуртов и

мороженого (Chen et al., 2012; Pereira-Caro et al., 2013b). Сорт Asamugasaki был взят в качестве одной из родительских форм для создания методом искусственной гибридизации нового глютенинового сорта Minenomugasaki с черной окраской перикарпа зерна. Сорт Minenomugasaki – раннеспелый, умеренно устойчив к полеганию, среднезерный с удлиненной зерновкой, более крупным зерном и высокой урожайностью по сравнению с родительской формой, среднеустойчив к листовой форме и слабоустойчив к метельчатой форме пирикулярноза и к холоду (Saka et al., 2007).

В Японии широко распространены чернозерные сорта риса Okunomugasaki и Hong Xie Nuo. В дополнение к ним четырехкратным беккроссом Hong Xie Nuo с белозерным сортом Koshihikari была создана новая изогенная линия Black rice NIL с высокой антиоксидантной активностью, превосходными вкусовыми качествами, пригодная для диетического питания (Maeda et al., 2014; Oikawa et al., 2015).

Индия является центром происхождения культуры риса, здесь распространены дикие виды риса. Поэтому в индийских коллекциях генетических ресурсов широко представлены образцы с пигментированной зерновкой. Так, в коллекции Центрального научно-исследовательского института риса (CRRI, Cuttack, штат Орисса) насчитывается 2960 образцов, 20 % из которых имеют окрашенный перикарп зерна, причем 17.4 % – краснозерные, 3.4 % – с черным зерном. Сорта краснозерного риса выращиваются во многих штатах Индии. Они устойчивы к неблагоприятным факторам среды, таким как неплодородные песчаные и засоленные почвы; засуха, глубокий слой воды, перепады высот и температуры в горных условиях. Краснозерные индийские сорта используются также в селекции как доноры устойчивости к основным вредителям и болезням (Ahuja et al., 2007).

В Корее рис с окрашенным перикарпом зерна считается компонентом здорового питания. Основные направления при селекции таких сортов – устойчивость к полеганию, высокий урожай и повышенное содержание фитохимических веществ. Антиоксидантная активность краснозерных сортов корейского риса варьировала от 12 до 96 % (Cho et al., 2017). Сорта Josenghugchal (черный перикарп) и Jegjinju (красный перикарп) содержат пигменты – антоцианы и полифенолы, а также в восемь раз больше, чем белозерные сорта риса, γ -аминонасыщенной кислоты. Аминонасыщенная кислота выполняет в организме функцию ингибирующего медиатора центральной нервной системы, снимает возбуждение и оказывает успокаивающее действие, ее можно принимать так же, как транквилизатор, но без риска развития привыкания. Поэтому данные сорта риса рекомендуют в качестве диетического питания при артериальной гипертензии. Сорта Neugjinjubeo и Neugseolbyeo отличаются высоким содержанием флавоноидов и каротиноидов. Они могут быть использованы как исходный материал при ведении селекции на высокое содержание этих биологически активных веществ (Kim et al., 2010).

Возделываются сорта риса с окрашенным перикарпом зерна и в других азиатских странах, причем как для внутреннего, так и для внешнего рынка. Таиланд, Мьянма и Камбоджа – известные экспортеры эксклюзивных сортов

риса в западные страны. Так, в пигментированных сортах риса из Таиланда, импортируемых в Италию, отмечено более высокое содержание биологически активных соединений, чем в белозерных итальянских сортах риса. Поэтому они могут быть рекомендованы потребителям в качестве источника здорового питания (Melini, Acquistucci, 2017).

В настоящее время ситуация на европейском рынке риса меняется в сторону расширения ассортимента продуктов из зерна риса. Согласно данным Международного научно-исследовательского института риса, спрос на рынке рисовой крупы на эксклюзивные сорта риса, в том числе ароматизированные и с окрашенным перикарпом зерна, растет на 6 % в год (Rice Almanac, 2013). Это способствует развитию импорта таких сортов из азиатских стран и проведению селекционных исследований по созданию линейки эксклюзивных сортов риса как в Европе, так и в России.

В Европе рис с окрашенным перикарпом зерна возделывается в Италии и Франции. Италия – самый крупный производитель риса в Евросоюзе. В настоящее время около 90 % итальянского риса выращивают в двух регионах: Пьемонте и Ломбардии, в том числе и сорта с зерном красно-коричневого и черного цвета. Среди них наиболее известны три сорта с черной окраской перикарпа зерна – Artemide, Venere, Nerone и два краснозерных – Ermez и Russ. Сорт Ermez отобран после спонтанной гибридизации сорта Venere и белозерного длиннозерного образца, относящегося к подвиду *indica*. Длиннозерный сорт Russ – результат искусственной гибридизации (Bordiga et al., 2014).

Сорт Venere создан при скрещивании стародавнего китайского образца риса с итальянской линией Padani для получения растений риса с черным зерном, адаптированных к условиям умеренного климата. Он относится к подвиду *japonica*, среднезерный. Этот рис обладает ароматом сандалового дерева, очень питателен, богат мезо- и микроэлементами: содержание кальция – 159 мг/кг, железа – 30.9, магния – 25.5, цинка – 26.7, селена – 0.043 мг/кг крупы. В крупе эксклюзивного сорта риса Nerone, созданного методом искусственной гибридизации, в четыре раза больше железа и на 1/3 больше фосфора, чем у других сортов риса с черным зерном. Сорт Artemide – спонтанный гибрид между сортом Venere и белозерным длиннозерным образцом. Окраска перикарпа зерна этих сортов связана с содержанием пигментов антоцианов, которые обладают антиоксидантным действием и являются природным средством, препятствующим старению. Все сорта риса итальянской селекции с черной окраской перикарпа зерна содержат повышенное количество флавоноидов и антоцианов по сравнению с белозерными и даже краснозерными сортами риса (Angelini et al., 2008; Bordiga et al., 2014).

На юге Франции, в Камарге в дельте реки Роны, фермеры выращивают рис с 1870 г. на засоленных землях, поскольку ни одна другая культура в таких условиях расти не могла. В 1983 г. французский фермер R. Griotto обнаружил растения спонтанного гибрида между диким краснозерным и культурным короткозерным рисом. С этого времени селекцией краснозерного камаргского риса занялись ученые из INRA (French National Institute for Agricultural Research). В результате проведенной работы в 1988 г. был создан эксклюзивный краснозерный сорт

риса с ореховым ароматом, получивший коммерческое название Camargue Red Rice. С 1992 г. он внедрен в промышленное производство, его выращивают по безгербицидной технологии, причем 90 % урожая отправляют на экспорт (Oulton, 2005). Биохимический анализ краснозерного риса из Камарга показал высокое содержание проантоцианидинов (0.2 мг/г). На их долю приходится более 60 % вторичных метаболитов, еще 26.7 % составляют каротиноиды и γ -оризанолы, менее 9 % – флавоны и флавонолы (Pereira-Cago et al., 2013a).

Зерно сортов риса с окрашенным перикарпом тверже, чем зерно белозерных. Это значительно увеличивает время приготовления блюд, что приводит к частичному разрушению полезных для здоровья фитохимических веществ. Чтобы уменьшить потерю питательной ценности, необходимо крупу предварительно замачивать в воде на 6–8 ч (Kushwaha, 2016). Необычный цвет и вкус таких блюд, а также их несомненная польза в лечении и профилактике многих заболеваний привлекают покупателей, и такой рис пользуется постоянным спросом (Melini, Acquistucci, 2017). Кроме того, экстракты из чернозерного риса благодаря наличию в их составе антоциана перспективны для создания новых источников натуральных пигментов, которые применяются в пищевой и фармацевтической промышленности (Bordiga et al., 2014). Соответственно, рост спроса привел к увеличению импорта сортов риса с окрашенным перикарпом зерна в Европу: в 2016 г. он составил 778 тыс. т, что на 24 % выше, чем в 2013 г. (СВУ, 2017).

В Российской Федерации рис с окрашенным перикарпом зерна до недавнего времени также импортировался. До 2012 г. не было зарегистрировано ни одного российского сорта риса с пигментированным зерном. Однако спрос на такой рис и принятый курс на импортозамещение делают актуальным выведение собственных сортов. Предварительные исследования и анализ мировой коллекции образцов риса выявили возможность создания отечественных эксклюзивных сортов с окрашенным перикарпом зерна.

Общее количество собранных в мире образцов риса составляет более 420 тыс. В Международном банке генетических ресурсов хранится около 900 тыс. образцов культурного и дикого риса (Rice Almanac, 2013). Свыше 5 тыс. из них – сорта, гибридные линии, сорно-полевые формы риса посевного (*O. sativa*) – хранятся в мировой коллекции ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (ВИР, Санкт-Петербург, Россия). Здесь представлены в основном белозерные амилозные разновидности, к которым относится большинство возделываемых сортов, в меньшем количестве – краснозерные амилозные и белозерные глютинозные разновидности *O. sativa*, относящиеся к подвидам *indica* и *japonica*, а также незначительное количество глютинозных краснозерных образцов подвида *indica* (Ляховкин, 2005).

Лучшие образцы риса мировой коллекции вошли в рабочую коллекцию Всероссийского научно-исследовательского института риса (ВНИИ риса, Краснодар). В настоящее время в ней насчитывается более 6.8 тыс. сорто-

образцов 82 разновидностей двух подвигов, *indica* и *japonica*, вида *O. sativa* (Коротенко и др., 2016).

С 2001 г. в России были начаты работы по искусственной гибридизации белозерного сорта риса Курчанка и краснозерных образцов риса для создания исходного селекционного материала и изучения наследования признака окраски перикарпа зерна (Zelenskaya et al., 2001). Материалом для отбора краснозерных образцов риса послужили устойчивые к полеганию сорно-полевые формы с неосыпающимися колосками, собранные на производственных посевах белозерных сортов риса в Краснодарском крае. Некоторые из этих образцов, спонтанные гибриды, имели фенотипическое сходство с возделываемыми сортами риса и унаследовали от них ряд хозяйственно ценных признаков. Эти образцы включены в дальнейшую селекционную проработку.

После многолетнего изучения полученного материала в селекционных питомниках и проведения многократного индивидуального отбора создана коллекция разнотипных краснозерных образцов риса, изучены их морфобиологические особенности и проведена технологическая оценка качества зерна. Эти селекционные образцы относились к подвиду *japonica* и ботанической разновидности *sundensis*. Они обладали одним или несколькими хозяйственно ценными признаками (раннеспелость, крупнозерность, отличное качество зерна, высокое содержание амилозы – 28.2 %), а также отличались присущими сорно-полевым формам риса быстрыми темпами роста растений, более высокой продуктивной кустистостью и конкурентоспособностью (Зеленская, 2015). Семь полученных образцов с зерном красно-коричневого цвета в 2012 г. передано в рабочую коллекцию ВНИИ риса (№ по каталогу: 04791–04797). Они могут быть использованы для генетических исследований и в качестве исходного материала для селекции на раннеспелость, продуктивность, высокое качество зерна.

Селекционная программа по созданию отечественных эксклюзивных сортов риса с окрашенным перикарпом зерна привела к выведению трех сортов, среди которых особо выделялся краснозерный длиннозерный сорт Марс (Зеленский и др., 2012). Он получен методом индивидуального отбора спонтанного гибрида в производственном посеве длиннозерного белозерного сорта Изумруд. Марс имеет период вегетации 112–117 дней и принадлежит к группе среднеспелых сортов, относится к подвиду *indica*, ботанической разновидности *philippensis*. Зерно длинное, узкое, веретеновидное ($l/b = 3.5$), с высокой стекловидностью – до 97 % (рис. 1). Растения сорта Марс среднеустойчивы к пирикулярриозу, не полегают, не осыпаются даже при перестое, но обмолачиваются легко (Zelensky, 2016). Крупа Марса обладает повышенной питательной ценностью, поэтому предназначена для приготовления лечебных продуктов питания и экзотических блюд. Сорт рекомендуется для технологии переработки зерна без шлифования или с частичным шлифованием.

Создание сорта Марс стало результатом первого аналитического этапа данной селекционной программы. Вторым этапом была синтетическая селекция, при которой целенаправленно проводились простые и сложные скрещивания белозерных сортов и краснозерных форм риса



Рис. 1. Сорт риса Марс (Каталог, 2015).



Рис. 2. Сорт риса Рубин (Каталог, 2015).

с последующей тщательной проработкой полученного гибридного материала. В результате созданы краснозерный сорт Рубин (Остапенко и др., 2012) и чернозерный глютинозный сорт Южная ночь (Остапенко и др., 2014).

Рубин – среднезерный сорт, получен методом индивидуального отбора из сложной гибридной популяции ВНИИР 7407/Курчанка/ВНИИР 10016//ВНИИР 2103/ВНИИР 10007. Среднепозднеспелый, с периодом вегетации 115–118 дней. Сорт относится к подвиду *japonica*, ботанической разновидности *subpyrocarpa* (рис. 2). Рубин среднеустойчив к пирикулярриозу, умеренно восприимчив к рисовой листовой нематоде (Зеленский и др., 2017). Крупа сорта предназначена для употребления в нешлифованном виде.

Сорт Южная ночь – короткозерный, глютинозный, с черным перикарпом зерна, создан методом индивидуального отбора из сложной гибридной популяции, полученной ступенчатой гибридизацией: Виолетта/РК 04629//Рубин/НВ-1//РК 04629/НВ-1. Сорт позднеспелый, с вегетационным периодом 128–130 дней. Относится к подвиду *japonica*, ботанической разновидности *dextrinosa* (рис. 3). Зерно мелкое, округлой формы (Зеленский и др., 2017). Крупа черной окраски, с повышенными питательными свойствами, предназначена для потребления в нешлифованном виде и приготовления диетических и экзотических блюд.

Проведенный во ВНИИ риса биохимический анализ показал, что новые эксклюзивные сорта с окрашенным перикарпом зерна по содержанию фитохимических элементов значительно отличаются от широко распространенного белозерного риса Рапан. Так, в зерне Рапана обнаружены только следы олеиновой и линолевой кислот, а в зерне сортов Марс, Рубин и Южная ночь их было по 43 % каждой. Содержание антиоксидантов у Рапана – 7, у Марса и Рубина по 45, а у Южной ночи – 105 мг/100 г продукта. Эти сорта обладают высокой питательной ценно-



Рис. 3. Сорт риса Южная ночь (Каталог, 2015).

стью: содержание протеина у сортов составило: Марс – 8; Южная ночь – 8.2; Рубин – 8.9 %, а амилозы – 18; 0 и 22 % соответственно. Кроме того, установлено, что гликемический индекс у краснозерных сортов Марс и Рубин одинаков и равен 45 у.е., у чернозерного глютинозного сорта Южная ночь – 35 у.е., а у белозерного сорта Рапан – 60 у.е. Это позволяет рекомендовать крупу сорта Южная ночь в качестве диетического продукта.

По результатам экспертной оценки ФГБУ «Государственная комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений» эти три сорта риса с окрашенным перикарпом зерна в 2011–2012 гг. были внесены в Государственный реестр охраняемых селекционных достижений (Каталог..., 2015). Все три сорта внедрены в производство и выращиваются в Краснодарском крае, в 2017 г. площадь посева составила 170 га.

Впоследствии во ВНИИ риса было создано еще три сорта с окрашенным перикарпом зерна, из них один краснозерный – короткозерный сорт Рыжик и два чернозерных – длиннозерный Гагат и среднезерный Мавр (Гончарова и др., 2015).

В настоящее время сорта риса с окрашенным перикарпом зерна кубанской селекции используются также в качестве исходного материала для создания эксклюзивных сортов селекционерами Казахстана (Рысбекова и др., 2017). Включение в селекционные программы образцов с пигментированным зерном из коллекций разных стран мира способствует развитию научных исследований и получению крупы риса с повышенной питательной ценностью.

Заключение

Рис – одна из ведущих и экономически значимых культур в мире. Производство риса в 2010 г. составило 696 млн т, причем 90 % этой культуры выращивается в азиатских странах. Он служит основным источником питания более чем для половины населения Земли, в том числе для самых бедных регионов, страдающих от голода. Пятая часть всех потребляемых с продуктами калорий приходится на рисовую крупу (Rice Almanac, 2013). На современном продовольственном рынке пользуются спросом не только белозерные амилозные сорта риса, но и традиционные сорта, пригодные для диетического и лечебного питания и приготовления блюд национальной кухни. Как правило, они имеют окрашенный перикарп зерна и содержат больше, по сравнению с белозерными сортами, количество антиоксидантов, витаминов и микроэлементов.

В ведущих рисосеющих странах наряду с белозерным рисом создаются и возделываются сорта с окрашенным перикарпом зерна. Крупа такого риса употребляется в пищу в нешлифованном виде, при этом сохраняется вся его питательная ценность. Сбор генетических ресурсов риса для использования в селекции ведется в большинстве стран, возделывающих рис. При создании новых сортов с окрашенным перикарпом зерна исходным материалом служат как стародавние сорта, так и сорно-полевые формы риса с неосыпающимися колосками, обладающие рядом хозяйственно ценных признаков. В селекционной практике многих рисосеющих стран широко используются как целенаправленная искусственная гибридизация, так и отбор спонтанных гибридов между белозерными, краснозерными и чернозерными образцами риса.

Внесенные в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, новые сорта риса с окрашенным перикарпом зерна Марс, Рубин и Южная ночь предназначены для решения важной задачи – полного импортозамещения. Эти сорта отличаются по форме, окраске и биохимическому составу зерна: амилозные краснозерные сорта – длиннозерный Марс и среднезерный Рубин, глютинозный сорт Южная ночь – с зерном черного цвета. Такой рис обладает лечебными свойствами и пригоден для изготовления детского и диетического питания. Дальнейшее развитие направления селекции сортов риса с окрашенным перикарпом зерна возможно благодаря созданному исходному материалу, который передан в коллекцию ВНИИ риса и используется в селекционном процессе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Вавилов Н.И. Теоретические основы селекции. М.: Наука, 1987.
- Гончарова Ю.К., Бушман Н.Ю., Верещагина С.А. Сорта риса с окрашенным перикарпом. Рисоводство. 2015;1-2(26-27):9-12.
- ГОСТ 6293–90. Рис. Требования при заготовках и поставках. Введ. 1991.07.01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002;6.
- Зеленская О.В. Сорные растения рисовых систем Краснодарского края. Краснодар: КубГАУ, 2015.
- Зеленский Г.Л., Зеленская О.В., Остапенко Н.В., Чалый Н.Ф., Алавердян Н.Ю. Российские краснозерные сорта риса, созданные для лечебного питания. АгроСнабФорум. 2017;6(154):58-63.
- Зеленский Г.Л., Зеленская О.В., Харитонов Е.М., Туманьян Н.Г., Лоточникова Т.Н. Патент РФ на селекционное достижение № 6525 от 31.08.2012 г. Сорт риса Марс. 31.08.2012. Государственный реестр охраняемых селекционных достижений (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017.
- Каталог сортов риса и овощебахчевых культур кубанской селекции. Краснодар: ЭДВИ, 2015.
- Коротенко Т.Л., Туманьян Н.Г., Петрухненко А.А. Биологические особенности качества зерна сортов риса отечественной и зарубежной селекции в условиях Кубани. Рисоводство. 2016;1-2(30-31):23-33.
- Ляховкин А.Г. Рис. Мировое производство и генофонд. СПб.: Профи-Информ, 2005.
- Остапенко Н.В., Досеева О.А., Чинченко Н.Н., Лоточникова Т.Н., Караченцев В.В., Харитонов Е.М. Патент РФ на селекционное достижение № 7566 от 03.12.2014 г. Сорт риса Южная ночь. Государственный реестр охраняемых селекционных достижений (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017.
- Остапенко Н.В., Лось Г.Д., Лоточникова Т.Н., Туманьян Н.Г., Малышева Н.Н., Харитонов Е.М. Патент РФ на селекционное достижение № 6526 от 31.08.2012 г. Сорт риса Рубин. Государственный реестр охраняемых селекционных достижений (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017.
- Рысбекова А.Б., Казкеев Д.Т., Усенбеков Б.Н., Мухина Ж.М., Жанбырбаев Е.А., Саргбаева И.А., Жамбакин К.Ж., Беркымбай Х.А., Батаева Д.С. Отбор предселекционного материала риса с окрашенным перикарпом на основе генотипирования по генам *Rc* и *Pb*. Генетика. 2017;53(1):43-53. DOI 10.7868/S0016675816110114.
- Ahuja U., Ahuja S., Chaudhary N., Thakrar R. Red rices – past, present, and future. Asian Agri. Hist. 2007;11:291-304.
- Angelini R., Ferrero A., Ponti I. Il Riso. Milano: Bayer Crop Science, 2008.
- Bordiga M., Gomez-Alonso S., Locatelli M., Travaglia F., Coisson J.D., Hermosin-Gutierrez I., Arlorio M. Phenolics characterization and antioxidant activity of six different pigmented *Oryza sativa* L. cultivars grown in Piedmont (Italy). Food Res. Int. 2014;65(Part B): 282-290. DOI 10.1016/j.foodres.2014.03.007.
- CBI (Centre for the Promotion of Imports from developing countries), 2017. Available at: <https://www.cbi.eu/market-information/grains-pulses/specialty-rice-varieties/>
- Chaudhary R.C., Tran D.V. Specialty rices of the world – a prologue. Specialty Rices of the World: Breeding, Production, and Marketing. Rome: FAO, Italy; Oxford IBN Publishers, India, 2001;3-14.
- Chen X.Q., Nagao N., Itani T., Irifune K. Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice. Food Chem. 2012;135(4):2783-2788. DOI 10.1016/j.foodchem.2012.06.098.
- Cho Y.H., Farhoudi R., Farooq M., Lee D.J. Evaluating Korean rice genotypes and landraces for octacosanol contents and antioxidant activity. Nat. Prod. Res. 2017;31(23):2778-2782. DOI 10.1080/14786419.2017.1292271.

- Dong Y.J., Xu J.L., Xiao K., Zhang Y.J., Zhang J.Z., Luo L.J., Mas-tuo M. Genomic regions associated with the degree of red coloration in pericarp of rice (*Oryza sativa* L.). *J. Cereal Sci.* 2008;48(2):556-560. DOI 10.1016/j.jcs.2007.11.011.
- Furukawa T., Maekawa M., Oki T., Suda I., Iida S., Shimada H., Takamura I., Kadowaki K. The Rc and Rd genes are involved in proanthocyanidin synthesis in rice pericarp. *The Plant J.* 2007;49(1):91-102. DOI 10.1111/j.1365-313X.2006.02958.x.
- Goufo P., Trindade H. Rice antioxidants: phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols, γ -oryzanol, and phytic acid. *Food Sci. Nutr.* 2014;2(2):75-104. DOI 10.1002/fsn3.86.
- Gunaratne A., Wu K., Li D., Bentota A., Corke H., Cai Y. Antioxidant activity and nutritional quality of traditional red-grained rice varieties containing proanthocyanidins. *Food Chem.* 2013;138:1153-1161. DOI 10.1016/j.foodchem.2012.11.129.
- Hu J., Anderson B., Wessler R. Isolation and characterization of rice *R* genes: evidence for distinct evolutionary paths in rice and maize. *Genetics.* 1996;142:1021-1031.
- Kim J.K., Lee S.Y., Chu S.M., Lim S.H., Suh S.C., Lee Y.T., Cho H.S., Ha S.H. Variation and correlation analysis of flavonoids and carotenoids in Korean pigmented rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *J. Agric. Food Chem.* 2010;58(24):12804-12809. DOI 10.1021/jf103277g.
- Kong S., Lee J. Antioxidants in milling fractions of black rice cultivars. *Food Chem.* 2010;120:278-281. DOI 10.1016/j.foodchem.2009.09.089.
- Kushwaha U.K.S. *Black Rice: Research, History and Development.* Springer International Publishing, Switzerland. 2016. DOI 10.1007/978-3-319-30153-2.
- Laokuldilok T., Shoemaker C.F., Jongkaewwattana S., Tulyathan V.J. Antioxidants and antioxidant activity of several pigmented rice brans. *Agric. Food Chem.* 2011;59(1):193-199. DOI 10.1021/jf103649q.
- Maeda H., Yamaguchi T., Omoteno M., Takarada T., Fujita K., Murata K., Iyama Y., Kojima Y., Morikawa M., Ozaki H., Mukaino N., Kidani Y., Ebitani T. Genetic dissection of black grain rice by the development of a near isogenic line. *Breed Sci.* 2014;64(2):134-141. DOI 10.1270/jsbbs.64.134.
- Melini V., Acquistucci R. Health-promoting compounds in pigmented Thai and wild rice. *Foods.* 2017;6(1):9. DOI 10.3390/foods6010009.
- Metwally T.F., El-Habab H.B., El-Malky M.M., Barakat A.S. Comparative studies for grain yield, grain quality, cooking quality and nutritional value traits of black rice variety. *J. Plant Production, Mansoura Univ.* 2014;5(3):401-414.
- Oikawa T., Maeda H., Oguchi T., Yamaguchi T., Tanabe N., Ebana K., Yano M., Ebitani T., Izawa T. The birth of a black rice gene and its local spread by introgression. *Plant Cell.* 2015;27(9):2401-2414. DOI 10.1105/tpc.15.00310.
- Oulton R. Camargue Red Rice. *CooksInfo.com.* Published 2005; revised 2007. Web. Accessed 13.02.2018. Available at: <http://www.cooksinfo.com/camargue-red-rice>.
- Pereira-Caro G., Cros G., Yokota T., Crozier A. Phytochemical profiles of black, red, brown and white rice from the Camargue region of France. *J. Agric. Food Chem.* 2013a;61(33):7976-7986. DOI 10.1021/jf401937b.
- Pereira-Caro G., Watanabe S., Crozier A., Fujimura T., Yokota T., Ashihara H. Phytochemical profile of a Japanese black-purple rice. *Food Chem.* 2013b;141:2821-2827. DOI 10.1016/j.foodchem.2013.05.100.
- Rahman M.M., Lee K.E., Lee E.S., Matin M.N., Lee D.S., Yun J.S., Kim J.B., Kang S.G. The genetic constitutions of complementary genes Pp and Pb determine the purple color variation in pericarps with cyanidin-3-O-glucoside depositions in black rice. *J. Plant Biol.* 2013;56(1):24-31. DOI 10.1007/s12374-012-0043-9.
- Rice Almanac. 4th edition. Global Rice Science Partnership. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 2013.
- Rice Recipes in the Philippines. Nueva Ecija: Philrice, 2005.
- Saka N., Terashima T., Kudo S., Kato T., Sugiura K., Endo I., Shirota M., Inoue M., Otake T. A new purple grain glutinous rice variety 'Minenomurasaki' for rice processing. *Res. Bull. Aichi Agric. Res. Ctr. (Japan).* 2007;39:111-120.
- Shao Y., Xu F., Chen Y., Huang Y., Beta T., Bao J. Analysis of genotype, environment, and their interaction effects on the phytochemicals and antioxidant capacities of red rice (*Oryza sativa* L.). *Cereal Chem.* 2015;92(2):204-210. DOI 10.1094/CCHEM-06-14-0126-R.
- Sumczynski D., Kotásková E., Družbíkova H., Mlček J. Determination of contents and antioxidant activity of free and bound phenolics compounds and in vitro digestibility of commercial black and red rice (*Oryza sativa* L.) varieties. *Food Chem.* 2016;15(211):339-346. DOI 10.1016/j.foodchem.2016.05.081.
- Sweeney M.T., Thomson M.J., Pfeil B.E., Mc Couch S. Caught red-handed: *Rc* encodes a basic helix-loop-helix protein conditioning red pericarp in rice. *Plant Cell.* 2006;18(2):283-294. DOI 10.1105/tpc.105.038430.
- Tang S., Wang Z. Breeding for superior quality aromatic rice varieties in China: Speciality rices of the world. *Breeding, Production and Marketing.* FAO, Rome. 2001;35-44.
- Wang C., Shu Q. Fine mapping and candidate gene analysis of purple pericarp gene *Pb* in rice (*Oryza sativa* L.). *Chinese Sci. Bull.* 2007;52:3097-3104. DOI 10.1007/s11434-007-0472-x.
- Xu T.Y., Sun J., Chang H.L., Zheng H.L., Wang J.G., Liu H.L., Yang L.M., Zhao H.W., Zou D.T. QTL mapping for anthocyanin and proanthocyanidin content in red rice. *Euphytica.* 2017;213(11):213-243.
- Zelenskaya O., Zelensky G., Yanchenko V. On the use of red rice in breeding. *Rice Genetic Resources and Breeding for Europe and Other Temperate Areas: Proc. of Eurorice 2001 Symposium, Krasnodar: KSAU – Montpellier: CIRAD, IRD, 3-8 September 2001.* Available at: <http://agritrop.cirad.fr/509127/>
- Zelensky G.L. *Rice: Biological Principles of Breeding and Farming Practices: Monograph.* Krasnodar: KubSAU, 2016.
- Zhang H., Shao Y., Bao J., Beta T. Phenolic compounds and antioxidant properties of breeding lines between the white and black rice. *Food Chem.* 2015;172:630-639. DOI 10.1016/j.foodchem.2014.09.118.
- Zhang M.W., Zhang R.F., Zhang F.X., Liu R.H. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties. *J. Agric. Food Chem.* 2010;58:7580-7587. DOI 10.1021/jf1007665.
- Zhu Q., Yu S., Zeng D., Liu H., Wang H., Yang Z., Xie X., Shen R., Tan J., Li H., Zhao X., Zhang Q., Chen Y., Guo J., Chen L., Liu Y.-G. Development of "Purple Endosperm Rice" by engineering anthocyanin biosynthesis in the endosperm with a high-efficiency transgene stacking system. *Mol. Plant.* 2017;10(7):918-929. DOI 10.1016/j.molp.2017.05.008.
- Ziska L.H., Gealy D.R., Burgos N., Caicedo A.L., Gressel J., Lawton-Rauh A.L., Avila L.A., Theisen G., Norsworthy J., Ferrero A., Vitto F., Johnson D.E., Ferreira F.G., Marchesan E., Menezes V., Cohn M., Linscombe S., Carmona L., Tang R., Merotto Jr. A. Weedy (red) rice: an emerging constraint to global rice production. *Adv. Agron.* 2015;129(Ch.3):181-228. DOI 10.1016/bs.agron.2014.09.003.