

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-772

УДК 633.18:581



Научные обзоры | Система селекции и семеноводства

## КРАСНОЗЕРНЫЕ И ЧЕРНОЗЕРНЫЕ СОРТА РИСА КАК ИСТОЧНИКИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И ГЕНЕТИЧЕСКАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ПРИЗНАКА В ЗЕРНОВКАХ РИСА

*Ю.К. Гончарова, С.В. Гончаров*

**Цель:** обзор отечественных и зарубежных исследований в области генетики содержания микро- и макроэлементов у риса.

**Материалы и методы.** Представлен обзор литературы и проанализированы научные исследования о содержании микроэлементов в крупе риса различных образцов, в том числе с окрашенным перикарпом, а также генетике этого признака.

**Результаты.** Недостаточное потребление микроэлементов приводит к нарушению обмена веществ и появлению целого спектра заболеваний. Чернозерный и краснозерный рис - один из самых перспективных источников антиоксидантов и микроэлементов, их в нем в 5-8 раз больше чем в белозерных сортах риса. Изучение генетических механизмов, контролирующих содержание микроэлементов, актуально в связи с их антиоксидантными и антимикробными свойствами. Установлено, что наблюдаемое на фенотипическом уровне внутривидовое разнообразие связано как с регуляторными, так и структурными генами. Изучение механизма генетической регуляции накопления микроэлементов у отечественных сортов риса на молекулярном уровне не проводилось.

**Заключение.** Данные о генетической регуляции синтеза веществ, повышающих питательную ценность зерна (микро и макроэлементов и т.д.), позволят интенсифицировать селекцию риса с целью создания сортов для производства функциональных продуктов питания.

**Ключевые слова:** рис; окрашенный перикарп; микроэлементы; регуляторные и структурные гены; маркер-ориентированная селекция; удвоенные гаплоиды; SSR маркеры

*Для цитирования.* Гончарова Ю.К., Гончаров С.В. Краснозерные и чернозерные сорта риса как источники микроэлементов и генетическая регуляция признака в зерновках риса // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Т. 16, №1. С. 164-188. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-772

Scientific Reviews | Plant Breeding and Seed Production

## RED GRAIN AND BLACK GRAIN RICE VARIETIES AS SOURCES OF MICROELEMENTS AND GENETIC REGULATION OF THE TRAIT IN RICE GRAIN

*Yu.K. Goncharova, S.V. Goncharov*

**Purpose:** review of domestic and foreign studies in the field of genetics of contents of micro- and macro elements in the rice grain

**Materials and methods.** A review of the literature is presented and scientific studies on the content of trace elements in rice grain of various samples, including those with colored pericarp, as well as the genetics of this trait, are analyzed.] Review of the literature is presented and scientific studies on

**Results.** Insufficient consumption of microelements leads to metabolic disorders and the emergence of a range of diseases. Rice with black and red pericarp is one of the most promising sources of antioxidants and microelements; its content is 5-8 times higher than in the grain of usual rice varieties. The study of genetic mechanisms controlling the content of microelements is relevant in connection with their antioxidant and antimicrobial properties. It is established that the intra-species diversity observed at the phenotypic level is associated with both regulatory and structural genes. The study of the mechanism of genetic regulation of the accumulation of microelements in domestic rice varieties at the molecular level has not previously been conducted.

**Conclusion.** Data on the genetic regulation of the synthesis of substances that increase the nutritional value of grain (micro and macro elements, etc.), will allow to intensify the rice breeding for varieties development suitable for the functional food production.

**Keywords:** rice; colored pericarp; microelements; regulatory and structural genes; marker-oriented selection; doubled haploids; SSR markers

**For citation.** Goncharova Yu.K, Gontcharov S.V. Red Grain and Black Grain Rice Varieties as Sources of Microelements and Genetic Regulation of the Trait in Rice Grain. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 164-188. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-772

### **Проблемы, вызываемые недостатком микроэлементов в питании**

Более трех миллиардов человек во всем мире – или половина населения планеты – страдают от дефицита важнейших витаминов и минералов (микро и макроэлементов), таких как витамин А, цинк и железо и т.д. Причем отмечено, что их число с каждым годом увеличивается. Это состояние называется «скрытый голод», так как люди, страдающие от такого вида недоедания, зачастую кажутся здоровыми, однако на самом деле они более уязвимы перед болезнями и инфекциями [12, 20]. В особо тяжелых случаях скрытый голод может стать причиной слепоты, замедления роста и развития интеллекта у детей, снижению зрения, а также повышения риска смерти матери при родах, повышению детской смертности. Основная функция микроэлементов – нормализация обмена веществ, недостаточное их потребление вызывает целый спектр заболеваний [8].

Недостаточное потребление микроэлементов приводит к нарушению обмена веществ и появлению целого спектра заболеваний. В Российской Федерации за последнее десятилетие только заболеваемость злокачественными новообразованиями выросла на 20,4 % [18]. В ассоциации онкологов подсчитали, что для обеспечения лечения всех раковых больных России необходимо 435 млрд. рублей в год. Предотвратить заболевания значительно легче, чем их лечить. По оценкам Американского общества по борьбе с раком, от 30 % до 40 % онкологических заболеваний и смертности при них напрямую связаны с рационом питания, прежде всего, с содержанием антиоксидантов и микроэлементов [25]. Установлено, что каждый второй россиянин нуждается в изменении своего питания, но при этом не имеет для этого достаточно денежных средств. Чернозерный и краснозерный рис – один из самых перспективных источников антиоксидантов и микроэлементов их в нем в 5-8 раз больше чем в белозерных сортах риса. За счет этих свойств черный рис признан «Супер-пищей XXI века». Изучение генетических механизмов, контролирующих содержание микроэлементов, актуально в связи с их антиоксидантными и антимикробными свойствами [11, 41]. Потребление этих элементов и их соединений будет способствовать профилактике онкологических заболеваний, снизит риск сердечнососудистых заболеваний, атеросклероза, диабета второго типа, повысит иммунитет, улучшит синтез зрительных пигментов, активизирует процессы обмена веществ и т.д. [13, 14]. Установлено, что наблюдаемое на фенотипическом уровне внутривидовое разнообразие связано как с регуляторными, так и структурными генами [22]. Изучение механизма генетической регуляции накопления микроэлементов у отечественных сортов

риса на молекулярном уровне не проводилось [2]. Данные о генетической регуляции синтеза веществ, повышающих питательную ценность зерна (микро и макроэлементов и т.д.), позволят интенсифицировать селекцию риса с целью создания сортов для производства функциональных продуктов питания.

Для организма человека жизненно важны все микроэлементы без исключения, так как каждый из них оказывает влияние на ту или иную сферу его функционирования. В первую очередь микроэлементы отвечают за развитие центральной нервной системы, формирование сердечно-сосудистой системы, влияют на работу защитных сил человеческого организма, а также играют существенную роль в снижении количества наиболее часто встречающихся внутриутробных отклонений [25].

Показано, что каких-либо нарушений минерального обмена не отмечено лишь у 4% людей, причем для многих известных заболеваний эти нарушения являются первопричиной или индикатором [11, 37]. В России из-за низкого экономического статуса подавляющего большинства населения среднее потребление свежих фруктов и ягод не превышает 15% от рекомендуемого количества, вследствие чего организм недополучает необходимых витаминов и эссенциальных (жизненно необходимых) микроэлементов. Недостаточность железа, цинка и меди, селена, магния зафиксирована в многочисленных эпидемиологических исследованиях обеспеченности эссенциальными микроэлементами, проведенных и в детских коллективах, в том числе [16]. Численность лиц с неадекватной обеспеченностью жизненно необходимыми микроэлементами во многих случаях достигает или даже превосходит 50% всего обследованного населения, что особенно характерно для малообеспеченных слоев [10]. Факт, что 50% и более этих микроэлементов в питании жителей нашей страны присутствуют в составе растительных продуктов, где их биодоступность низка, только усугубляет ситуацию. Анализ содержания селена в сыворотке крови свидетельствует о риске недостатка этого микроэлемента для значительного числа групп риска жителей Российской Федерации (проживающие в селенодефицитных регионах, беременные женщины и дети раннего возраста, больные гастроэнтерологическими заболеваниями) [9]. В частности, показано, что уровень селена в сыворотке крови более чем у 50% рожениц, обследованных в роддомах г. Рязани, был ниже 50 мкг/л. Общая антиоксидантная активность в сыворотке крови у детей, родившихся от женщин с дефицитом микроэлементов, достоверно снижена по сравнению с младенцами, матери которых были ими адекватно обеспечены.

Эти данные свидетельствуют об актуальности проблемы недостаточной обеспеченности населения РФ рядом жизненно необходимых микроэлементов, что делает необходимым поиск их новых пищевых форм. Возможность синтеза этих веществ в условиях лаборатории проблемы не решает, так как попадание эссенциальных микроэлементов в организм человека вместе с растительной либо животной пищей принесет значительно больше пользы, чем прием полученных в результате химического синтеза препаратов, что связано с возможностью передозировки [5, 19, 20].

Применение микроэлементов в клинической медицине пока носит ограниченный характер. Так, препараты железа, кобальта, меди, марганца эффективно используются в лечении некоторых видов анемий [6, 15]. Нейропротективные препараты, в состав которых входят эссенциальные микроэлементы применяют для лечения заболеваний нервной системы. Показано, что они способствуют восстановлению нарушенных функций и более эффективному действию лекарственных препаратов [15].

Минеральные вещества обладают доказанной антиканцерогенной активностью. Важная роль отводится магнию, кальцию и селену. Наиболее известным противоопухолевым элементом из них является селен. Кроме селена и йода противоопухолевой активностью обладают другие макро- и микроэлементы, содержащиеся в пищевых продуктах. Среди них – германий, калий, кальций, магний, марганец, молибден, медь, цинк [19]. Повышенный риск нарушений обмена микроэлементов отмечен у лиц опасных и вредных профессий. В результате наблюдается целый каскад патологических изменений, ведущий к повышению заболеваемости и снижению профессионального долголетия. Поэтому актуальной задачей профилактической медицины является своевременное выявление лиц с отклонениями в обеспеченности макро- и микроэлементами и проведение коррекционных мероприятий [15].

Еще одна проблема, во многих странах мира отмечен рост числа лиц с избыточной массой. Так, количество жителей с избыточным индексом массы тела за последние 30 лет в США выросло вдвое, причем это особенно актуально для молодых людей [25]. Избыточная масса тела существенно повышает риски возникновения сахарного диабета 2 типа, гипертонической болезни, заболеваний печени и некоторых типов онкологических заболеваний. Связь содержания химических элементов и метаболических нарушений, приводящих к набору массы тела показана в многочисленных работах. Так, отрицательные корреляционные взаимосвязи свидетельствует о связи уровня содержания цинка в организме с повышением индекса массы тела, уровня лептина, глюкозы крови, инсу-

лина плазмы, что подтверждается [27, 28]. Кроме того, снижение концентрации цинка в волосах женщин отмечено с возрастом [31]. Установлена положительная корреляция уровня лептина не только с возрастом, индексом массы тела, но и с уровнем сывороточной меди [55, 56]. Отмечено, что повышение уровня меди в сыворотке крови сопровождалось снижением содержания цинка и магния. В условиях мегаполиса потребность в поступлении магния увеличивается при различных видах стресса [40]. Современная западная диета при этом в большинстве случаев обеднена магнием. Многоэлементный анализ волос здоровых женщин возрастом от 20 до 50 лет показал, что женщины с индексом массы тела менее 18 продемонстрировали повышенное значение в волосах коэффициента Ca/Mg, Fe/Cu, Zn/Cu и снижение коэффициента K/Na по сравнению с контрольной группой (индекс массы тела от 18 до 25). Повышение коэффициента K/Na и снижение коэффициентов Fe/Cu и Zn/Cu в волосах наблюдалось, когда этот индекс превышал 35 [57]. Взаимосвязь между обменом витамина А, йода и цинка также отмечена рядом исследователей. Витамин А оказывает влияние на обменные процессы в щитовидной железе и является одним из факторов, которые способствуют развитию йоддефицитных состояний [46, 58]. Синергетический эффект обнаружен по действию цинка и витамина А на статус данного витамина в организме. Дефицит витамина А в организме можно устранить только при совместном введении с цинком, так как последний играет существенную роль во внутри- и в межклеточном транспорте витамина А [24, 51]. Цинк также принимает участие в поглощении витамина А в кишечнике [23]. Умеренная йодная недостаточность была обнаружена, в частности, у населения Республики Адыгея [17]. Контроль за достаточным поступлением в организм человека витамина А и цинка в регионах с недостаточным содержанием йода в окружающей среде, как отмечается, должен стать одним из обязательных этапов в профилактике йоддефицитных состояний и уменьшении числа групп риска [21]. Функциональные продукты питания, обогащенные витаминами и микронутриентами, таким образом, становятся важным дополнительным источником незаменимых микронутриентов в сложившейся ситуации.

### **Доноры и источники повышенного содержания микроэлементов среди образцов риса**

Недостаток микроэлементов в питании широко распространен в различных странах, особенно среди бедных групп населения, суточное

потребление калорий, которых в основном ограничивается зерновыми культурами [35]. Развитие биофортификации крупы (особенно богатой минералами рисовой) остается эффективным средством борьбе с неполноценным питанием в развивающихся странах и во всем мире, тем более что выявлено значительное снижение содержания микроэлементов в сортах овощей и фруктов в последние годы [4]. Зерновки риса являются важными источниками микроэлементов, таких как железо (Fe), цинк (Zn), марганец (Mn), медь (Cu) и селен (Se), а также токсичных тяжелых металлов, особенно кадмия (Cd). В то же время, в качестве побочного эффекта модернизации, повсеместно становится все более серьезным загрязнение пахотных земель тяжелыми металлами. Концентрация токсичных минералов, особенно кадмия (Cd), увеличивается в зерновых культурах, что угрожает здоровью людей. В настоящее время, в связи с быстрым распространением культивирования риса на Северо-восточном Китае, концентрация микро и макро-элементов в зерне риса подвида *japonica* становится все более важной [34]. Повышенное внимание исследователей к культуре риса определяется относительно небольшим геномом, что значительно облегчает работу и позволяет экстраполировать результаты на другие культуры [26, 42, 47, 54]. Кроме того, рис остается самой популярной в мире основной продовольственной культурой. Накопление микроэлементов в зерновке (НМВ) и загрязнение тяжелыми металлами относятся к сложным признакам, контролируемым множественными количественными локусами (QTL). Диапазон вариаций признаков НМВ в измельченных зернах 700 образцов риса: Fe от 0,9 до 9,1 ppm (среднее значение 2,4); Zn от 5,8 до 29,6 ppm (16,4); Cd от 0,002 до 0,054 ppm (0,009); Mn от 3,6 до 22,0 промилле (со средним значением 9,7), Cu от 0,8 до 7,5 ч / млн. (со средним значением 3,2 ч / млн.), Se от 0,01 до 0,11 ч / млн. (со средним значением 0,04 ч / млн.). Большая часть образцов подвида *japonica* имеет более высокое содержание Zn и Cu, но более низкие концентрации Cd. Для остальных трех признаков распределение фенотипических значений между двумя подвидами заметно перекрывалось, особенно по концентрации Se. Установлено влияние на значения признаков НМВ множества факторов, включая различные условия окружающей среды, почвы. 38 аллелей (47,5 %) из 80 локусов увеличивали признаки НМВ, 42 (52,5 %) уменьшали [53]. Статистические значения эффектов QTL для НМВ в белом (шлифованном) зерне намного ниже по сравнению с QTL, обнаруженными для признака в зернах бурого риса (табл. 1).

Таблица 1.

**Доноры и источники повышенного содержания микроэлементов  
у образцов риса**

Генотипы риса	Микроэлемент	Источник
SL-32, Annada, ASD16, CH-45, Nagina 22, Swarna, IR-29, Pusa Sugandha-1, IRGC-106187, IR68144-3B-2-2-3, IRGC-105320, IRGC-105320, IRGC-86476, CH-45, Jyoti, HKR-126, Varsha, MSE-9, Jalmagna, Zuchem, Kalabath, Pusa Basmati, Noothipattu, Pitchavari, Thanu, TKM-9, NDR-6279, Aghonibora	Fe (>20 ppm)	35, 36, 52
Nagina 22, Honduras, RG-187, SL-32, Aghoni bora, Annada, ASD-16, Jalmagna, CH-45, BPT-5204, Lalat, Sasyasri, Swarna, IR-29, Pusa Sugandha-1, IRGC-106187, IRGC-105320, IRGC-86476, Benibhog, CH-45, Jyoti, HKR-126, Pant Sugandh-17, Ratna, Chitiimutyalu, Ranbir basmati, IRRI-38, Jeerigesanna, Kalabath, Pusa Basmati, Noothipattu, Madhukar, Swarna, AM-141, Thanu, TKM-9, NDR-6279, Aghonibora and Pitchavari	Zn (>20 ppm)	38, 52

**Генетический механизм, лежащий в основе накопления  
минеральных веществ в зерновке (НМВ)**

На сегодняшний день генетический механизм, лежащий в основе накопления минеральных веществ в зерновке (НМВ) остается в значительной степени неизвестным. Исследования QTL были проведены с различными популяциями риса: рекомбинантные инбредные и дигаллоидные линии, группы сортов контрастные по признаку [49]. Использование для этих целей популяций контрастных по признаку образцов, позволяет значительно сократить трудоемкость исследования, но позволяет выделить только локусы со значительными вкладами в фенотипическое проявление признака [1, 7]. QTL, определяющие изучаемый признак, сгруппированы в зонах на хромосомах 2, 3, 4, 6, 7, и 11. В частности, есть три QTL региона, контролирующие концентрацию Cd в зернах риса на хромосомах 4, 7 и 11, среди которых один на хромосоме 7 найден, как отвечающий за формирование признака в четырех различных работах. Ген был идентифицирован как *OsNramp1*, он отвечает за их накопление в алейроновом слое, а не в эндосперме, который составляет большую часть размолотого зерна [32, 43]. Клонированы и другие гены, идентифицированные как локусы, связанные с накоплением микроэлементов, такие как: *OsVIT* и *OsNAS* для Fe, *OsLCT1*, и *OsHMA3* для Cd, *OsNramp5* и *OsHMA4* для Mn [39]. В настоящее время несколькими молекулярными биологами предпринимаются попытки

с использования эндоспермоспецифичных промоторов, чтобы улучшить НМВ в измельченных зернах [45]. В Китае изучали 698 коллекционных образцов, двух подвидов *indica* и *japonica* для выявления локусов количественных признаков (QTL), связанных с накоплением Fe, Zn, Cu, Mn, Mg и Se. Всего в геноме обнаружено 47 регионов QTL, в том числе 18 локусов и 29 кластеров (охватывающих 62 локуса), ответственных за формирование признака в зерне риса. Было обнаружено, что 10 хромосомных областей, связанных с формированием признака (при изучении контрастных групп сортов) расположенных в регионах, где ранее обнаружены QTL по признаку при картировании популяций [44]. В восьми из этих областей на хромосомах 1, 4, 6, 7 были идентифицированы гены-кандидаты. В общей сложности 192 гена-кандидата были выделены для дальнейшего анализа с использованием полиморфизма миллиона локусов одиночных нуклеотидов (SNP). 37 генов (19,3%) показали достоверную связь ассоциации между QTL и вариацией признака у гаплотипов, путем парного сравнения. Установлены фенотипические значения признаков гаплотипов каждого гена кандидата. Выявлены как гены кандидаты QTL (*qFe6-2* и *qZn7*), так и гены, определяющие основной вклад в формирование признаков НМВ (Fe, Zn и Cd).

В работах, где для картирования QTL этих локусов использовали специализированные популяции, например, беккроссные инбредные линии (backcrossed inbred lines (BILs), полученные от скрещивания донора и элитных сортов был оценен генетический фон и взаимодействие генотип-среда [29, 48, 58]. Идентифицированы 12 локусов, определяющих содержание железа в образцах риса (табл. 2): три локуса расположены на первой хромосоме *qFe.1* - фланкирующие маркеры RM259-RM243, *qFe1.1* (RM243-RM488), *qFe1.2* (RM488-RM490) [30, 49].

Таблица 2.

**Локусы количественных признаков, определяющие содержание микроэлементов в зерновке риса [53]**

Признаки качества	Chr	QTLs	Фланкирующие маркеры	Тип популяции	Популяции	Источник
1	2	3	4	5	6	7
MAC-P	1	<i>qP.1</i>	RM3411	LT/TL-RILs	TeQing/Lemont	43
MAC-K	1	<i>qK.1</i>	RM5501	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MAC-P	1	<i>qP.1</i>	RM495	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MAC-Cd	1	<i>qCd.1</i>	RM6840	LT-RILs		
Zn	1	<i>qZn.1</i>	RM34-RM237	DHs	IR64/Azucena	50

Mn	1	<i>qMn.1</i>	RM243-RM312	DHs		
MAC-Co	1	<i>qCo.1</i>	RM490	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MAC-Ca	1	<i>qCa1-1</i>	RM6480	ILs	<i>O. rufpogon</i> /Teqing	32
MAC-P	1	<i>qP1-1</i>	RM212	ILs		
Fe	1	<i>qFe1.1</i>	RM243-RM488	RILs	Madhukar/ Swarna	44
Fe	1	<i>qFe1.2</i>	RM488-RM490	RILs		
Fe	1	<i>qFe.1</i>	RM259-RM243	RILs	Zhenshan 97/Minghui	49
MIC-Fe	2	<i>qFe2-1</i>	RM6641	ILs	<i>O. rufpogon</i> /Teqing	32
MIC-Cu	2	<i>qCu.2</i>	RM6378	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MAC-Sr	2	<i>qSr.2</i>	RM3688	LT-RILs		
Fe	2	<i>qFe.2</i>	RM53-RM300	DHs	IR64/Azucena	50
MIC-Cu	2	<i>qCu.2</i>	RM6378	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MAC-Sr	2	<i>qSr.2</i>	RM3688	LT-RILs		
Fe	2	<i>qFe.2</i>	RM53-RM300	DHs	IR64/Azucena	50
MIC-Fe	2	<i>qFe.2</i>	RM452	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MIC-Mn	2	<i>qMn2-1</i>	RM6367	ILs	<i>O. rufpogon</i> /Teqing	32
MAC-S	2	<i>qS.2</i>	RM266	LT-RILs	Lemont/TeQing	43
MAC-Ca	3	<i>qCa.3</i>	RM5626-RM16	LT/TL-RILs		
MAC-Rb	3	<i>qRb.3</i>	RM489	LT-RILs		
MAC-Mg	3	<i>qMg3-1</i>	RM5488	ILs	<i>O. rufpogon</i> /Teqing	32
Ca	3	<i>qCa.3</i>	RM200-RM227	RILs	Zhenshan 97/Minghui	49
Zn	3	<i>qZn3.1</i>	RM7-RM517	RILs	Madhukar × Swarna	44
PC	3	<i>qPC-3</i>	RM251-RM282	RILs	Xieqingzao B/Milyang	33
Mn	3	<i>qMn.3</i>	RM227-R1925	RILs	Zhenshan 97/Minghui	49
Cu	3	<i>qCu.1</i>	R1925-RM148	RILs		
Cu	5	<i>qCu.5</i>	C1447-RM31	RILs	Zhenshan 97/Minghui	49
PA	5	<i>qPA.5</i>	RM305-RM178	DHs	IR64/Azucena	50
FC	5	<i>qFC-5</i>	RG480-RM274	RILs	Xieqingzao B/Milyang	33
Fe	5	<i>qFe5.1</i>	RM574-RM122	RILs	Madhukar/Swarna	44
MAC-Ca	5	<i>qCa5-1</i>	RM598	ILs	<i>O. rufpogon</i> /Teqing	32
MIC-Zn	5		RM421	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MIC-Cu	6	<i>qCu6-1</i>	RM204	ILs	<i>O. rufpogon</i> /Teqing	32
Zn	6	<i>qZn.6</i>	RZ398-RM204	RILs	Zhenshan 97/Minghui	49
PC	6	<i>qPC-6</i>	RM190-RZ516	RILs	Xieqingzao B/Milyang	33
MAC-Mg	6	<i>qMg.6</i>	OSR 21	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MIC-Mn	7	<i>qMn.7</i>	RM214	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
Zn	7	<i>qZn7.3</i>	RM501-OsZip2	RILs	Madhukar/Swarna	44
Fe	7	<i>qFe7.1</i>	RM234-RM248	RILs		
MAC-P	7	<i>qP.7</i>	RM70-RM172	DHs	IR64/Azucena	50

MIC-Zn	8	<i>qZn8-1</i>	RM152	ILs	O. rufpogon/Teqing	32
MAC-K	8	<i>qK8-1</i>	RM3572	ILs	O. rufpogon/Teqing	32
Zn	8	<i>qZn.8</i>	RM25-R1629	RILs	Zhenshan 97/Minghui	49
Cu	8	<i>qCu.8</i>	RM201-C472	RILs		
Fe	8	<i>qFe.8</i>	RM137-RM325A	DHs	IR64/Azucena	50
MAC-P	9	<i>qP9-1</i>	RM201	ILs	O. rufpogon/Teqing	32
MAC-Mg	10	<i>qMg.10</i>	RM467	LT-RILs	Lemont/TeQing	43
MAC-Mg	11	<i>qMg.11</i>	RM332	LT/TL-RILs	Lemont/TeQing	43
MIC-Cu	11	<i>qCu.11</i>	RM167	LT-RILs		
Fe	11	<i>qFe.11</i>	RZ536-TEL3	RILs	Zhenshan 97/Minghui	49
Fe	12	<i>qFe.12</i>	RM270-RM17	DHs		
Zn	12	<i>qZn.12</i>	RM235-RM17	DHs		
Fe	12	<i>qFe12.2</i>	RM260-RM7102	RILs	Madhukar/Swarna	44
Fe	12	<i>qFe12.1</i>	RM17-RM260	RILs		
Zn	12	<i>qZn12.2</i>	RM260-RM7102	RILs		

MIC – микроэлементы; MAC – макроэлементы; \* Выделены пиковые маркеры

О генах, связанных с содержанием железа на второй хромосоме *qFe2-1*, *qFe.2* сообщается в нескольких работах, они расположены в районах локализации маркеров *RM6641*, *RM53-RM300* и *RM 452* [32, 43, 50]. На двенадцатой хромосоме также расположено 3 локуса, определяющие признак *qFe.12*, *qFe12.1*, *qFe12.2*, они фланкируются маркерами RM270-RM17, RM17-RM260, RM260-RM7102 соответственно [44]. Также есть сообщения о QTL, определяющих признак на 5 (RM574-RM122), 8 (RM137-RM325A) и 11 хромосомах (RZ536-TEL3) (James et al., 2007). Содержание цинка в образцах риса определяется шестью локусами на хромосомах 1 (RM34-RM237), 3 (RM7-RM517), 5 (RM421), 6 (RZ398-RM204) и 12 (2 локуса) (RM235-RM17, RM260-RM7102) [43, 44, 49, 50]. За содержание магния отвечают 4 хромосомных региона: на 3 (в районе расположения SSR-маркера RM5488), 6 (OSR 21), 10 (RM467), 11 (RM332) хромосомах [32, 43]. Содержание марганца в образцах риса определяется четырьмя локусами: на 1 (RM243-RM312), 2 (RM6367), 3 (RM227-R1925), 7 RM214 хромосомах [32, 43, 49].

Содержание фосфора зависело от полиморфизма двух регионов на первой и девятой хромосоме в районах расположения маркеров RM 212 и RM 201 [3, 32]. Полиморфизм содержания меди связан с шестью хромосомными регионами: на 2 (RM6378), 3 (R1925-RM148), 5 (C1447-RM31), 6 (RM204), 8 (RM201-C472), 11 (RM167) хромосомах [32, 43, 49]. Четыре локуса определяют содержание кальция на 1 (RM6480), 3 (2 локуса) (RM200-RM227, RM5626-RM16) и 5 хромосомах (RM598) [32, 49].

Локусы, определяющие содержание аминокислот, изучала группа китайских ученых [57]. Они выявили девять регионов ответственных за их формирование: 1, 2 (2 локуса), 3, 4, 7, 8 (2 локуса), 9, 10 хромосомах (рис. 1).

Таким образом, на сегодняшний день при создании сортов функционального назначения с использованием маркеров контролируют 12 локусов, определяющих содержание железа в образцах риса: хромосома 1 *qFe.1* (фланкирующие маркеры RM259-RM243), *qFe1.1* (RM243-RM488), *qFe1.2* (RM488-RM490); хромосома 2: *qFe2-1*, *qFe.2* (RM6641, RM53-RM300 и RM452). Хромосома 12: *qFe.12*, *qFe12.1*, *qFe12.2* (RM270-RM17, RM17-RM260, RM260-RM7102); хромосомы 5 (RM574-RM122), 8 (RM137-RM325A), 11 (RZ536-TEL3). Шесть локусов, определяющих содержание цинка: *qZn.1* (RM34-RM237), *qZn.3* (RM7-RM517), *qZn.5* (RM421), *qZn.6* (RZ398-RM204) и *qZn.12* (2 локуса, фланкируются RM235-RM17, RM260-RM7102). Полиморфизм 4 генов связан с содержанием магния: *qMg3-1* в районе расположения SSR маркера RM5488; *qMg6* (OSR 21); *qMg10* (RM467); *qMg11* (RM332). Содержание марганца определяется четырьмя локусами: *qMn.1* (RM243-RM312), *qMn.3* (RM227-R1925), *qMn.2* (RM6367), *qMn.7* (RM214). Содержание меди контролируют, определяя полиморфизмом шести хромосомных регионов: *qCu.2* (RM6378); *qCu.3* (R1925-RM148); *qCu.5* (C1447-RM31); *qCu.6* (RM204); *qCu.8* (RM201-C472); *qCu.11* (RM167).

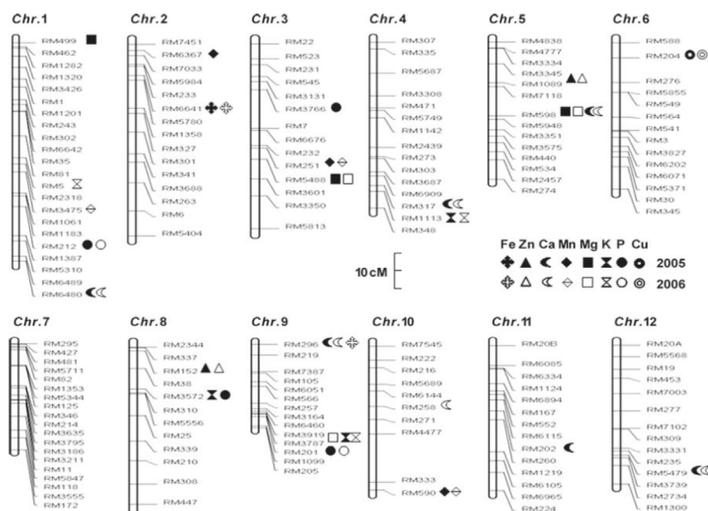


Рис. 1. Положения молекулярных маркеров, сцепленных с локусами, определяющими содержание микроэлементов в зерновках образцов риса [32]

Для маркирования использована популяция интрогрессивных линий полученная при гибридизации сорта Tегing и дикого вида риса *Oryza rufipogon* [32].

Данные о генетической регуляции синтеза веществ, повышающих питательную ценность зерна (микро- и макроэлементов и т.д.), позволят интенсифицировать селекцию риса с целью создания сортов для производства функциональных продуктов питания.

**Информация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация о спонсорстве.** Работа поддержана грантом Фонда содействия инновациям № 4654ГС2/48601.

#### *Список литературы*

1. Гончарова, Ю. К. Молекулярное маркирование в селекции растений на примере риса: монография / Ю. К. Гончарова. М.: Русайнс, 2018. 201 с. URL: <https://book.ru/book/931176> (дата обращения: 24.07.2023).
2. Гончарова Ю.К., Харитонов Е.М. Генетический контроль признаков, связанных с усвоением фосфора у сортов риса (*Oryza sativa* L.) // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015. Т. 19. № 2. С. 47-54.
3. Гончарова Ю.К., Харитонов Е.М., Шелег В.А. Молекулярные маркеры генов, определяющих эффективность минерального питания у риса (*Oryza sativa* L.): мини-обзор. // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 3. С. 515-525.
4. Концепция создания Российской национальной системы функциональных продуктов питания / Фотев Ю.В., Пивоваров В.Ф., Артемьева А.М., Куликов И.М., Гончарова Ю.К., Сысо А.И., Гончаров Н.П. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. Т. 22. № 7. С. 776-783.
5. Маймулов В.Г., Нагорный С.В., Шабров А.В. Основы системного анализа в эколого-гигиенических исследованиях. СПб: СПбГМА им. И.И. Мечникова, 2000. 342 с.
6. Микроэлементный статус вегетарианцев – жителей крупного промышленного центра Западной Сибири / Турчанинов Д.В., Ерофеев Ю.В., Вильямс Е.А., Баранова Т.А. // Микроэлементы в медицине. 2007. Т. 8. № 1. С. 41-42.
7. Молекулярное маркирование признаков, определяющих качество зерна у российских сортов риса / Гончарова Ю.К., Харитонов Е.М., Малюченко Е.А., Бушман Н.Ю. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. Т. 22. № 1. С. 79-87.

8. Назаров А.А. Долголетие без болезней. Минеральные воды на страже здоровья. М.: ИИЦ «Открытое Решение», 2008. 152 с.
9. Определение химических элементов в биологических средах и препаратах методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой: Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. 56 с.
10. Оценка элементного статуса работников металлургического производства: методологический аспект / Фомин И.Н., Соколов С.П., Грабеклис А.Р., Надоров С.А., Скальный А.В. // Микроэлементы в медицине. 2007. Т. 8. № 1. С. 25–29.
11. Получение, оценка качества и безопасности новых пищевых источников эссенциальных микроэлементов / Гмошинский И.В., Зорин С.Н., Баяржаргал М., Сафронова А.М., Мартынова Е.А., Шилина Н.М., Гмошинская М.В., Мазо В.К. // Микроэлементы в медицине. 2007. Т. 8. № 1. С. 21-23.
12. Распространенность поведенческих факторов риска сердечнососудистых заболеваний в российской популяции по результатам исследования ЭС-СЭ-РФ / Баланова Ю.А., Концевая А.В., Шальнова С.А., Деев А.Д., Артамонова Г.В., Гагагонова Т.М., Дупляков Д.В., Ефанов А.Ю., Жернакова Ю.В., Ильин В.А., Конради А.О., Либис Р.А., Минаков А.В., Недогода С.В., Оганов Р.Г., Ощепкова Е.В., Романчук С.В., Ротарь О.П., Трубачева И.А., Шляхто Е.В. // Профилактическая медицина. 2014. Т. 17. № 5. С. 42-51.
13. Селен в организме человека: метаболизм, антиоксидантные свойства, роль в канцерогенезе / Тутельян В.А., Княжев В.А., Хотимченко С.А., Голубкина Н.А., Кушлинский Н.Е., Соколов Я.А. М.: Издательство РАМН, 2002. 224 с.
14. Скальный А.В. Распространенность микроэлементозов у детей в различных регионах России // Материалы Всероссийской школы «Геохимическая экология и биогеохимическое районирование биосферы». М., 2000. С. 209-211.
15. Скальный А.В., Быков Б.В. Эколого-физиологические аспекты применения макро- и микроэлементов в восстановительной медицине. Оренбург: РИК ГОУ ОГУ, 2003. 198 с.
16. Содержание селена и антиоксидантная активность молозива, грудного молока, сыворотки крови рожениц и их новорожденных детей в Москве и Рязани / Гмошинский И.В., Шилина Н.М., Дмитриев А.В., Алешина М.В.Г.И.В., Фатеева Е.М., Мазо В.К., Конь И.Я. // Вопросы детской диетологии. 2004. Т. 2. № 5. С. 16-21.
17. Состояние здоровья сельских жителей республики АДЫГЕЯ по результатам первого этапа диспансеризации / Самородская И.В., Болотова Е.В., Тимофеева Ю.К., Хитлянов Э.А. // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2016. Т. 15. № 2. С. 112-120.

18. Состояние онкологической помощи населению России в 2016 году / ред. Каприн А.Д., Старинский В.В., Петрова Г.В. М.: МНИОИ им. П.А. Герцен, филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2017. 236 с.
19. Тутельян В.А. Коррекция микронутриентного дефицита важнейший аспект концепции здорового питания населения России // Вопросы питания. 1999. №. 1. С. 3-11.
20. Цикуниб А.Д., Агиров А.Х., Цику Р.Х. Традиции и адаптационные свойства пищи. Майкоп, 1998. 68 с.
21. Цинк в питании человека физиологические потребности и биодоступность / Мазо В.К., Гмошинский И.В., Скальный А.В., Сысоев Ю.А. // Вопросы питания. 2002. Т. 71. № 3. С. 46-51.
22. Хлесткина Е.К., Шоева О.Ю., Гордеева Е.И. Гены биосинтеза флавоноидов пшеницы // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2014. Т. 18. № 4/1. С. 784-796.
23. Ahn J, Koo S.I. Effects of zinc and essential fatty acid deficiencies on the lymphatic absorption of vitamin A and secretion of phospholipids // Journal of Nutritional Biochemistry. 1995. Vol. 12. № 6. P. 595–603.
24. Alterations in plasma essential trace elements selenium, manganese, zinc, copper, and iron concentrations and the possible role of these elements on oxidative status in patients with childhood asthma / Kocyigit A., Armutcu F., Gurel A., Ermis B. // Biological Trace Element Research. 2004. Vol. 97. № 1. P. 31-41.
25. Changes in cardiovascular health in the United States, 2003-2011 / Pilkerton C.S., Singh S.S., Bias T.K., Frisbee S.J. // American Heart Association. 2015. Vol. 4. P. 38-42.
26. Changes in mineral elements and starch quality of grains during the improvement of japonica rice cultivars / Hao Z., Chao Y., Danping H., Hailang L., Huiting Z., Rongrong T., Han C., Junfei G., Lijun L., Zujian Z., Zhiqin W., Jianchang Y. // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2018. Vol. 98. № 1. P. 122-133.
27. Chen M.D., Lin P.Y., Sheu W.H.H. Zinc status in plasma of obese individuals during glucose administration // Biological Trace Element Research. 1997. Vol. 60. № 1-2. P. 123-129.
28. Chen M.D., Song Y.M., Lin P.Y. Zinc may be a mediator of leptin production in humans // Life Science. 2000. Vol. 66. № 22. P. 2143-2149.
29. Comparative mapping of chalkiness components in rice using five populations across two environments / Peng B., Wang L., Fan C., Jiang G., Luo L., Li Y., He Y. // BMC Genetics. 2014. Vol. 15. № 49. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-49>
30. Concentration of calcium, copper, iron, magnesium, potassium, sodium and zinc in adult female hair with different body mass indexes in Taiwan / Wang C.T.,

- Chang W.T., Zeng W.F., Lin C.H. // *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*. 2005. Vol. 43. № 4. P. 389-393.
31. Determination of serum copper, zinc and selenium in healthy subjects / Gha-you-Mobarham M., Taylor A., New S.A., Lamb D.J., Ferns G.A. // *Annals of Clinical Biochemistry*. 2005. Vol. 42. № 5. P. 365-375.
  32. Genetic identification of quantitative trait loci for contents of mineral nutrients in rice grain / Garcia-Oliveira A.L., Tan L., Fu Y., Sun C. // *Journal of Integrative Plant Biology*. 2009. Vol. 51. P. 84-92.
  33. Genetic relationship between grain yield and the contents of protein and fat in a recombinant inbred population of rice / Yu Y.H., Li G., Fan Y.Y., Zhang K.Q., Min J., Zhu Z.W., Zhuang J.Y // *Journal of Cereal Science*. 2009. Vol. 50. № 1. P. 121-125.
  34. Genome-wide association studies of 14 agronomic traits in rice landraces / Huang X., Wei X., Sang T., Zhao Q., Feng Q., Zhao Y., Li C., Zhu C., Lu T., Zhang Z., Li M., Fan D., Guo Y., Wang A., Wang L., Deng L., Li W., Lu Y., Weng Q., Liu K., Huang T., Zhou T., Jing Y., Li W., Lin Z., Buckler E.S., Qian Q., Zhang Q.F., Li J., Han B. // *Nature Genetics*. 2010. Vol. 42. № 11. P. 961-967.
  35. Gregorio G.B. Progress in breeding for trace minerals in staple crops // *Journal of Nutritional*. 2002. Vol. 132. P. 500-50.
  36. Gregorio, G.B., Senadhira, D. Genetic analysis of salinity tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) // *Theoretical and Applied Genetics*. 1993. Vol. 86. P. 333–338.
  37. Hansen M., Sandstrom B., Lonnerdal B. The effect of casein phosphopeptides on zinc and calcium absorption from high phytate infant diets assessed in rat pups and Caco-2 cells // *Pediatric Research*. 1996. Vol. 40. № 4. P. 547-552.
  38. Identification of putative candidate gene markers for grain zinc content using recombinant inbred lines (RIL) population of IRRI38 X Jeerigesanna / Gande N.K., Kundur pp.J., Soman R., Ambati R., Ashwathanarayana R., Bekele B.D., Shashidhar H.E. // *African Journal of Biotechnology*. 2014. Vol. 13. № 5. P. 657-663.
  39. Iron fortification of rice seeds through activation of the nicotianamine synthase gene / Lee S., Jeon U.S., Lee S.J., Kim Y.K., Persson D.pp., Husted S., Schjorring J.K., Kakei Y., Masuda H., Nishizawa N.K., Ana G. // *Proceedings of the National Academy of Science*. 2009. Vol. 106. № 51. P. 22014-22019.
  40. Kumeda Y., Inaba M. Metabolic syndrome and magnesium // *Clinical Calcium*. 2005. Vol. 15. № 11. P. 1859-1866.
  41. Kushwaha, U.K. *Black Rice*. Springer International Publishing Switzerland. 2016. 192 p.

42. Lee G.H., Yun B.W., Kim K.M. Analysis of QTLs associated with the rice quality related gene by double haploid populations // *International Journal of Genomics*. 2014. Vol. 2014, Article ID 781832, 6 p.
43. Mapping and validation of quantitative trait loci associated with concentrations of 16 elements in unmilled rice grain / Zhang M., Pinson S.R., Tarpley L., Huang X., Lahner B., Yakubova E., Baxter I.R., Guerinot M., Salt D.E. // *Theoretical and Applied Genetics*. 2014. Vol. 127. № 1. P. 137-165.
44. Mapping QTLs and candidate genes for iron and zinc concentrations in unpolished rice of Madhukar. Swarna RILs / Anuradha K., Agarwal S., Rao Y.vol., Rao K., Viraktamath B., Sarla N. // *Gene*. 2012. Vol. 508. № 2. P. 233–240.
45. Nicotianamine, a novel enhancer of rice iron bioavailability to humans / Zheng L., Cheng Z., Ai C., Jiang X., Bei X., Zheng Y., Glahn R.pp., Welch R.M., Miller D.D., Lei X.G., Shou H. // *Plos One*. 2010. Vol. 5. № 4. 10190. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010190>
46. Oba K., Kimura S Effect of vitamin A deficiency on thyroid function and serum thyroxine levels in the rat // *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*. 1980. Vol. 26. P. 327-334.
47. QTL mapping and Q X E interactions of grain cooking and nutrient qualities in rice under upland and lowland environments / Yongmei G., Ping M., Jiafu L., Yixuan L., Zichao L. // *Acta Genetica Sinica*. 2007. Vol. 34. P. 420–428.
48. QTL mapping of grain quality traits in rice / Lou J., Chen L., Yue G., Lou Q., Mei H., Xiong L., Luo L. // *Journal of Cereal Science*. 2009. Vol. 50. P. 145–151.
49. Quantitative trait loci controlling Cu, Ca, Zn, Mn and Fe content in rice grains / Kaiyang L., Lanzhi L., Xingfei Z., Zhihong Z., Tongmin M., Hu Z. // *Journal of Genetics*. 2008. Vol. 87. № 3. P. 305-310.
50. Quantitative trait loci for phytate in rice grain and their relationship with grain micronutrient content / James C.R., Huynh B.L., Welch R.M., Choi E.Y., Graham R.D. // *Euphytica*. 2007. Vol. 154. № 3. P. 289-294.
51. Rahman A.S., Macnee W. Role of oxidant/antioxidant in smoking-induced lung diseases // *Free Radical Biology and Medicine*. 1996. Vol. 21. P. 669-682.
52. Babu Ravindra V. Importance and advantages of rice biofortification with iron and zinc // *An Open Access Journal published by ICRISAT. SAT*. 2013. Vol. 11. P. 1-6.
53. Rice grain nutritional traits and their enhancement using relevant genes and QTLs through advanced approaches / Mahender A., Anandan A., Kumar S., Pandit pp., Pandit E. // *SpringerPlus*. 2016. Vol. 5, 2086. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3744-6>
54. Scanning QTLs for grain shape using a whole genome SNP array in rice / Hu W., Wen M., Han Z., Tan C., Xing Y. // *Journal of Plant Biochemistry & Physiology*. 2013. Vol. 104. № 1. P. 2-5.

55. Serum copper, zinc, ceruloplasmin and superoxide dismutase in Thai overweight and obese / Tungtrongchitr R., Pongpaew pp. Phonrat B., Tungtrongchitr A., Vudhivai N., Schepl F.pp. // Journal of the Medical Association of Thailand. 2003. Vol. 86. № 6. P. 543-551.
56. Serum Cu levels and not Zn are positively associated with serum leptin concentrations in the healthy adult population / Olusi S., Al-Awardhi A., Abiaka C., Abraham M., George S. // Biological Trace Element Research. 2004. Vol. 100. № 1. P. 95-96.
57. The QTL controlling amino acid content in grains of rice (*Oryza sativa* L.) are co-localized with the regions involved in the amino acid metabolism pathway / Wang L., Zhong M., Li X., Yuan D., Xu Y., Liu H., He Y., Luo L., Zhang Q. // Molecular Breeding. 2008. Vol. 21. P. 127-137.
58. Xu X., Bai G. Whole-genome resequencing: changing the paradigms of SNP detection, molecular mapping and gene discovery // Molecular Breeding. 2015. Vol. 35. № 33. <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0240-6>
59. Zimmermann M.B. Iodine Deficiency // Endocrine Reviews. 2009. Vol. 30. № 4. P. 376-408.

### References

1. Goncharova Yu.K. *Molekulyarnoe markirovanie v selektsii rasteniy na primere risa : monografiya* [Molecular labeling in plant breeding on the example of rice]. M.: RU Science, 2018. 201 p. URL: <https://book.ru/book/931176> (accessed July 24, 2023).
2. Goncharova Yu.K., Kharitonov E.M. Geneticheskii kontrol' priznakov, svyazannykh s usvoeniem fosfora u sortov risa (*Oryza sativa* L.). [Genetic control of traits associated with the absorption of phosphorus in rice varieties (*Oryza sativa* L.)]. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii* [Vavilov's journal of genetics and plant breeding], 2015. vol. 19, no. 2, pp. 47-54.
3. Goncharova Yu.K., Kharitonov E.M., Sheleg V.A. Molekulyarnye markery genov, opredelyayushchikh effektivnost' mineral'nogo pitaniya u risa (*Oryza sativa* L.): mini-obzor. [Molecular markers of genes that determine the effectiveness of mineral nutrition in rice (*Oryza sativa* L.): a mini-review]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* [Agricultural biology], 2017, vol. 52, no. 3, pp. 515-525.
4. Fotev Yu.V., Pivovarov V.F., Artem'eva A.M., Kulikov I.M., Goncharova Yu.K., Syso A.I., Goncharov N.P. Kontseptsiya sozdaniya Rossiyskoy natsional'noy sistemy funktsional'nykh produktov pitaniya [The concept of creating the Russian National System of Functional Foods] *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii* [Vavilov's journal of genetics and plant breeding], 2018, vol. 22, no. 7, pp. 776-783.

5. Maymulov V.G., Nagornyy C.B., Shabrov A.B. *Osnovy sistemnogo analiza v ekologo-gigienicheskikh issledovaniyakh* [Fundamentals of system analysis in ecological and hygienic research]. SPb: SPbGMA im. I.I. Mechnikova, 2000, 342 p.
6. Turchaninov D.V., Erofeev Yu.V., Vi-l'yams E.A., Baranova T.A. Mikroelementnyy status vegetariantsev – zhitel'ey krupnogo promyshlennogo tsentra Zapadnoy Sibiri [Microelement status of vegetarians - residents of a large industrial center of Western Siberia]. *Mikroelementy v meditsine* [Microelements in the medicine], 2007, vol. 8, no. 1, pp. 41–42.
7. Goncharova Yu.K., Kharitonov E.M., Malyuchenko E.A., Bushman N.Yu. Molekulyarnoe markirovanie priznakov, opredelyayushchikh kachestvo zerna u rossiyskikh sortov risa [Molecular marking of traits that determine grain quality in Russian rice varieties]. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* [Vavilov's journal of genetics and plant breeding], 2018, vol. 22, no. 1, pp. 79-87.
8. Nazarov A.A. *Dolgoletie bez bolezney. Mineral'nye vody na strazhe zdorov'ya* [Longevity without disease. Mineral waters on guard of health]. M.: Otkrytoe Reshenie, 2008, 152 p.
9. *Opreделение khimicheskikh elementov v biologicheskikh sredakh i prepara-takh metodami atomno-emissionnoy spektrometrii s induktivno svyazan-nyoy plazmoy i mass-spektrometrii s induktivno svyazannoy plazmoy: Metodicheskie ukazaniya* [Determination of chemical elements in biological media and preparations by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry: Guidelines]. M.: Federal'nyy tsentr gos-sanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2003, 56 p.
10. Fomin I.N., Sokolov S.P., Grabeklis A.R., Nadorov S.A., Skal'nyy A.V. Otsenka elementnogo statusa rabotnikov metallurgicheskogo proizvodstva: metodologicheskiy aspekt [Assessment of the elemental status of workers in metallurgical production: methodological aspect], *Mikroelementy v meditsine* [Microelements in the medicine], 2007, vol. 8, no. 1, pp. 25–29.
11. Gmoshinskiy I.V., Zorin S.N., Bayarzhargal M., Safronova A.M., Martynova E.A., Shilina N.M., Gmoshinskaya M.V., Mazo V.K. Poluchenie, otsenka kachestva i bezopasnosti novykh pishchevykh istochnikov essential'nykh mikroelementov [Obtaining, assessing the quality and safety of new food sources of essential trace elements]. *Mikroelementy v meditsine* [Microelements in the medicine], 2007, vol. 8, no. 1, pp. 21-23.
12. Balanova Yu.A., Kontsevaya A.V., Shal'nova S.A., Deev A.D., Artamonova G.V., Gatagonova T.M., Duplyakov D.V., Efanov A.Yu., Zhernakova Yu.V., Il'in V.A., Konradi A.O., Libis R.A., Minakov A.V., Nedogoda S.V., Oganov R.G., Oshchepkova E.V., Romanchuk S.V., Rotar' O.P., Trubacheva I.A., Shlyakhto E.V. Rasprostranennost' povedencheskikh faktorov riska serdechnosudil'stykh

- zabolevaniy v rossiyskoy populyatsii po rezul'tatam issledovaniya ESSE-RF [The prevalence of behavioral risk factors for cardiovascular diseases in the Russian population according to the results of the ESSE-RF study], *Profilakticheskaya meditsina* [Preventive medicine], 2014, vol. 17, no. 5, pp. 42-51.
13. Tutel'yan V.A., Knyazhev V.A., Khotimchenko S.A., Golubkina N.A., Kushlinskiy N.E., Sokolov Ya.A. *Selen v organizme cheloveka: metabolizm, antioksidantnye svoystva, rol' v kantserogeneze* [Selenium in the human body: metabolism, antioxidant properties, role in carcinogenesis]. M.: RAMN, 2002, 224 p.
  14. Skal'nyy A.V. Rasprostranennost' mikroelementozov u detey v razlichnykh regionakh Rossii [The prevalence of microelementoses in children in various regions of Russia], *Materialy Vserossiyskoy shkoly «Geokhimicheskaya ekologiya i biogeokhimicheskoe rayonirovanie biosfery»* [Materials of the All-Russian school «Geochemical ecology and biogeochemical zoning of the biosphere»]. M., 2000, pp. 209-211.
  15. Skal'nyy A.V., Bykov B.V. *Ekologo-fiziologicheskie aspekty primeneniya makro- i mikroelementov v vosstanovitel'noy meditsine* [Ecological and physiological aspects of the use of macro- and microelements in restorative medicine]. Orenburg, 2003, 198 p.
  16. Gmoshinskiy I.V., Shilina N.M., Dmitriev A.V., Aleshina M.V.G.I.V., Fateeva E.M., Mazo V.K., Kon' I.Ya. Soderzhanie selena i antioksidantnaya aktivnost' moloziya, grudnogo moloka, syvorotki krovi rozhenits i ikh novorozhdennykh detey v Moskve i Ryazani [Selenium content and antioxidant activity of colostrum, breast milk, blood serum of women in labor and their newborns in Moscow and Ryazan], *Voprosy detskoy dietologii* [Questions of children's dietology], 2004, vol. 2, no. 5, pp. 16-21.
  17. Samorodskaya I.V., Bolotova E.V., Timofeeva Yu.K., Tkhitlyanov E.A. Sostoyanie zdorov'ya sel'skikh zhiteley respubliki Adygeya po rezul'tatam pervogo etapa dispanserizatsii [The state of health of rural residents of the Republic of Adygea according to the results of the first stage of clinical examination], *Vestnik Smolenskoy gosudarstvennoy meditsinskoy akademii* [Bulletin of the Smolensk State Medical Academy], 2016, vol. 15, no. 2, pp. 112-120.
  18. *Sostoyanie onkologicheskoy pomoshchi naseleniyu Rossii v 2016 godu* [The state of oncological care for the population of Russia in 2016], Kaprin A.D., Starinskiy V.V., Petrova G.V., editors. M.: MNIOI im. P.A. Gertsen, 2017, 236 p.
  19. Tutel'yan V.A. Korrektsiya mikronutrientnogo defitsita vazhneyshiy aspekt kontseptsii zdorovogo pitaniya naseleniya Rossii [Correction of micronutrient deficiency is the most important aspect of the concept of healthy nutrition of the population of Russia]. *Voprosy pitaniya* [Nutrition Issues], 1999, no. 1, pp. 3-11.

20. Tsikunib A.D., Agirov A.Kh., Tsiku R.Kh. *Traditsii i adaptatsionnye svoystva pishchi* [Traditions and adaptive properties of food], Maykop, 1998, 68 p.
21. Mazo V.K., Gmoshinskiy I.V., Skal'nyy A.V., Sysoev Yu.A. Tsink v pitanii cheloveka fiziologicheskie potrebnosti i biodostupnost' [Zinc in human nutrition physiological requirements and bioavailability]. *Voprosy pitaniya* [Nutrition Issues], 2002, vol. 71, no. 3, pp. 46-51.
22. Khlestkina E.K., Shoeva O.Yu., Gordeeva E.I. Geny biosinteza flavonoidov pshenitsy [Genes for the biosynthesis of wheat flavonoids]. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* [Vavilov's journal of genetics and plant breeding], 2014, vol. 18, no. 4/1, pp. 784-796.
23. Ahn J, Koo S.I. Effects of zinc and essential fatty acid deficiencies on the lymphatic absorption of vitamin A and secretion of phospholipids. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 1995, vol. 12, no. 6. pp. 595–603.
24. Kocyigit A., Armutcu F., Gurel A., Ermis B., Alterations in plasma essential trace elements selenium, manganese, zinc, copper, and iron concentrations and the possible role of these elements on oxidative status in patients with childhood asthma. *Biological Trace Element Research*, 2004, vol. 97, no. 1, pp. 31–41.
25. Pilkerton C.S., Singh S.S., Bias T.K., Frisbee S.J., Changes in cardiovascular health in the United States, 2003-2011. *American Heart Association*, 2015, vol. 4, pp. 38-42.
26. Hao Z., Chao Y., Danping H., Hailang L., Huiting Z., Rongrong T., Han C., Junfei G., Lijun L., Zujian Z., Zhiqin W., Jianchang Y., Changes in mineral elements and starch quality of grains during the improvement of japonica rice cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, vol. 98, no. 1, pp. 122-133.
27. Chen M.D., Lin P.Y., Sheu W.H.H. Zinc status in plasma of obese individuals during glucose administration. *Biological Trace Element Research*, 1997, vol. 60, no. 1-2, pp. 123-129.
28. Chen M.D., Song Y.M., Lin P.Y. Zinc may be a mediator of leptin production in humans, *Life Science*, 2000, vol. 66, no. 22, pp. 2143-2149.
29. Peng B., Wang L., Fan C., Jiang G., Luo L., Li Y., He Y. Comparative mapping of chalkiness components in rice using five populations across two environments. *BMC Genetics*, 2014, vol. 15, no. 49. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-49>
30. Wang C.T., Chang W.T., Zeng W.F., Lin C.H. Concentration of calcium, copper, iron, magnesium, potassium, sodium and zinc in adult female hair with different body mass indexes in Taiwan. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 2005, vol. 43, no. 4, pp. 389-393.
31. Ghayour-Mobarham M., Taylor A., New S.A., Lamb D.J., Ferns G.A. Determination of serum copper, zinc and selenium in healthy subjects. *Annals of Clinical Biochemistry*, 2005, vol.42, no. 5, pp. 365-375.

32. Garcia-Oliveira A.L., Tan L., Fu Y., Sun C. Genetic identification of quantitative trait loci for contents of mineral nutrients in rice grain. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, vol. 51, pp. 84-92.
33. Yu Y.H., Li G., Fan Y.Y., Zhang K.Q., Min J., Zhu Z.W., Zhuang J.Y Genetic relationship between grain yield and the contents of protein and fat in a recombinant inbred population of rice. *Journal of Cereal Science*, 2009, vol. 50, no. 1, pp. 121-125.
34. Huang X., Wei X., Sang T., Zhao Q., Feng Q., Zhao Y., Li C., Zhu C., Lu T., Zhang Z., Li M., Fan D., Guo Y., Wang A., Wang L., Deng L., Li W., Lu Y., Weng Q., Liu K., Huang T., Zhou T., Jing Y., Li W., Lin Z., Buckler E.S., Qian Q., Zhang Q.F., Li J., Han B. Genome-wide association studies of 14 agronomic traits in rice landraces. *Nature Genetics*, 2010, vol. 42, no. 11, pp. 961-967.
35. Gregorio G.B. Progress in breeding for trace minerals in staple crops. *Journal of Nutritional*, 2002, vol. 132, pp. 500-550.
36. Gregorio, G.B., Senadhira, D. Genetic analysis of salinity tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 1993, vol. 86, pp. 333-338.
37. Hansen M., Sandstrom B., Lonnerdal B. The effect of casein phosphopeptides on zinc and calcium absorption from high phytate infant diets assessed in rat pups and Caco-2 cells. *Pediatric Research*, 1996, vol. 40, no. 4, pp. 547-552.
38. Gande N.K., Kundur pp.J., Soman R., Ambati R., Ashwathanarayana R., Bekele B.D., Shashidhar H.E. Identification of putative candidate gene markers for grain zinc content using recombinant inbred lines (RIL) population of IRRI38 X Jeerigesanna. *African Journal of Biotechnology*, 2014, vol. 13, no. 5, pp. 657-663.
39. Lee S., Jeon U.S., Lee S.J., Kim Y.K., Persson D.pp., Husted S., Schjorring J.K., Kakei Y., Masuda H., Nishizawa N.K., Ana G. Iron fortification of rice seeds through activation of the nicotianamine synthase gene. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2009, vol. 106, no. 51, pp. 22014-22019.
40. Kumeda Y., Inaba M. Metabolic syndrome and magnesium. *Clinical Calcium*, 2005, vol. 15, no. 11, pp. 1859-1866.
41. Kushwaha, U.K. *Black Rice*. Springer International Publishing Switzerland, 2016, 192 p.
42. Lee G.H., Yun B.W., Kim K.M. Analysis of QTLs associated with the rice quality related gene by double haploid populations. *International Journal of Genomics*, 2014, vol. 2014, Article ID 781832.
43. Zhang M., Pinson S.R., Tarpley L., Huang X., Lahner B., Yakubova E., Baxter I.R., Guerinot M., Salt D.E. Mapping and validation of quantitative trait loci associated with concentrations of 16 elements in unmilled rice grain. *Theoretical and Applied Genetics*, 2014, vol. 127, no. 1, pp. 137-165.

44. Anuradha K., Agarwal S., Rao Y.vol., Rao K., Viraktamath B., Sarla N. Mapping QTLs and candidate genes for iron and zinc concentrations in unpolished rice of Madhukar. Swarna RILs. *Gene*, 2012, vol. 508, no. 2, pp. 233–240.
45. Zheng L., Cheng Z., Ai C., Jiang X., Bei X., Zheng Y., Glahn R.pp., Welch R.M., Miller D.D., Lei X.G., Shou H. Nicotianamine, a novel enhancer of rice iron bioavailability to humans. *Plos One*, 2010, vol. 5, no. 4, 10190. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010190>
46. Oba K., Kimura S Effect of vitamin A deficiency on thyrioid function and serum thyroxine levels in the rat. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 1980, vol. 26, pp. 327-334.
47. Yongmei G., Ping M., Jiafu L., Yixuan L., Zichao L. QTL mapping and Q X E interactions of grain cooking and nutrient qualities in rice under upland and lowland environments. *Acta Genetica Sinica*, 2007, vol. 34, pp. 420–428.
48. Lou J., Chen L., Yue G., Lou Q., Mei H., Xiong L., Luo L., QTL mapping of grain quality traits in rice. *Journal of Cereal Science*, 2009, vol. 50, pp. 145-151.
49. Kaiyang L., Lanzhi L., Xingfei Z., Zhihong Z., Tongmin M., Hu Z. Quantitative trait loci controlling Cu, Ca, Zn, Mn and Fe content in rice grains. *Journal of Genetics*, 2008, vol. 87, no. 3, pp. 305–310.
50. James C.R., Huynh B.L., Welch R.M., Choi E.Y., Graham R.D. Quantitative trait loci for phytate in rice grain and their relationship with grain micronutrient content. *Euphytica*, 2007, vol. 154, no. 3, pp. 289-294.
51. Rahman A.S., Macnee W. Role of oxidant/antioxidant in smoking-induced lung diseases. *Free Radical Biology and Medicine*, 1996, vol. 21, pp. 669–682.
52. Ravindra Babu V. Importance and advantages of rice biofortification with iron and zinc. *An Open Access Journal published by ICRISAT. SAT*. 2013, vol. 11, pp. 1-6.
53. Mahender A., Anandan A., Kumar S., Pandit P., Pandit E. Rice grain nutritional traits and their enhancement using relevant genes and QTLs through advanced approaches. *SpringerPlus*, 2016, vol. 5, 2086. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3744-6>
54. Hu W., Wen M., Han Z., Tan C., Xing Y. Scanning QTLs for grain shape using a whole genome SNP array in rice. *Journal of Plant Biochemistry & Physiology*, 2013, vol. 104, no. 1, pp. 2-5.
55. Tungtrongchitr R., Pongpaew P. Phonrat B., Tungtrongchitr A., Vudhivai N., Schepl F.P. Serum copper, zinc, ceruloplasmin and superoxide dismutase in Thai overweight and obese. *Journal of the Medical Association of Thailand*, 2003, vol. 86, no. 6, pp. 543-551.
56. Olusi S., Al-Awardhi A., Abiaka C., Abraham M., George S. Serum Cu levels and not Zn are positively associated with serum leptin concentrations in the

- healthy adult population. *Biological Trace Element Research*, 2004, vol. 100, no. 1, pp. 95-96.
57. Wang L., Zhong M., Li X., Yuan D., Xu Y., Liu H., He Y., Luo L., Zhang Q. The QTL controlling amino acid content in grains of rice (*Oryza sativa* L.) are co-localized with the regions involved in the amino acid metabolism pathway, *Molecular Breeding*, 2008. vol. 21, pp. 127-137.
58. Xu X., Bai G. Whole-genome resequencing: changing the paradigms of SNP detection, molecular mapping and gene discovery. *Molecular Breeding*, 2015, vol. 35, no. 33, <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0240-6>
59. Zimmermann M.B. Iodine Deficiency. *Endocrine Reviews*, 2009, vol. 30, no. 4, pp. 376-308.

### **ВКЛАД АВТОРОВ**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

### **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

The authors contributed equally to this article.

### **ДАнные ОБ АВТОРАХ**

**Гончарова Юлия Константиновна**, доктор биологических наук, заведующая лабораторией генетики и гетерозисной селекции  
*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный Научный Центр РИСА»; ООО «Аратай» посёлок Белозерный, 3, г. Краснодар, 50921, Российская Федерация*  
*yuliya\_goncharova\_20@mail.ru*

**Гончаров Сергей Владимирович**, доктор биологических наук, заведующий кафедрой генетики, селекции и семеноводства  
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» ул. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Российская Федерация*  
*serggontchar@hotmail.com*

### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Yulia K. Goncharova**, Dr. Sc. (Biology), Head of the Laboratory of Genetics and heterosis Breeding

*Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Rice Centre»; LLC «Aratay»*

*3, Belozerny, Krasnodar, 350921, Russian Federation*

*yuliya\_goncharova\_20@mail.ru*

*SPIN-code: 2127-9490*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2643-7342>*

*ResearcherID:*

*Scopus Author ID: 55330951600*

**Sergey V. Gontcharov**, Dr. Sc. (Biology), Head of the Genetics, Plant Breeding and Seed Production Department

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin»*

*13, Kalinina Str., Krasnodar, 35044, Russian Federation*

*serggontchar@hotmail.com*

*SPIN-code: 5882-8021*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6317-7175>*

*ResearcherID: V-8501-2017*

*Scopus Author ID: 36442282400*

Поступила 05.08.2023

После рецензирования 30.08.2023

Принята 10.09.2023

Received 05.08.2023

Revised 30.08.2023

Accepted 10.09.2023