

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ХРОМОСОМНЫХ РЕГИОНОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СОДЕРЖАНИЕ МАГНИЯ И КАЛЬЦИЯ У ОБРАЗЦОВ РИСА

© 2023 г. Ю. К. Гончарова^{1, 3, *}, В. В. Симонова¹, С. В. Гончаров², Н. А. Очкас³

¹Федеральный научный центр риса, Краснодарский край, пос. Белозерный, 350921 Россия

²Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, Краснодар, 350044 Россия

³ООО “Аратай”, участник инновационного центра Сколково, Москва, 143026 Россия

*e-mail: yuliya_goncharova_20@mail.ru

Поступила в редакцию 13.05.2023 г.

После доработки 14.06.2023 г.

Принята к публикации 15.06.2023 г.

Отмечено широкое варьирование по признаку “содержание микро- и макроэлементов” как между подвидами, так и внутри видов и сортов риса. Магний как кофактор участвует более чем в 300 ферментативных реакциях и нужен для роста и развития как растений, так и человека. Он влияет на обмен углеводов и белковых веществ. От его концентрации зависят производство аденозинтрифосфата (АТФ), синтез нуклеотидов и глюкозы, регуляция окисления липидов. Кальций также необходим для формирования структуры клеточных стенок и их деления. Высокие концентрации кальция изменяют состав и состояние мембран эритроцитов, морфологические характеристики клетки. В то же время вариabельность по признакам отечественных сортов риса до сих пор не изучалась. Также не было исследований о локализации хромосомных регионов, ответственных за формирование признаков “содержание магния и кальция” у российских образцов риса. Установлено широкое варьирование содержания кальция (0.07–2.33%) и магния (2–14%) у отечественных образцов риса. Данные по фенотипированию отечественных сортов риса по признакам качества использовали для выделения контрастных по этим признакам групп сортов и источников. Проведен поиск хромосомных регионов, определяющих качество отечественных образцов, с использованием 58 распределенных по геному риса молекулярных маркеров (SSR) как сцепленных с признаком, так и нейтральных. Выделены пять локусов, определяющих содержание магния и кальция у отечественных сортов риса. Локусы, определяющие содержание магния, расположены на хромосомах 5, 6, 7, 8. Связанных с содержанием кальция было выделено четыре локуса: один на второй хромосоме (при уровне значимости 0.05) и по одному на второй, восьмой и пятой (при уровне значимости 0.09). На пятой хромосоме он расположен (RM 13; 28.6 cM) в непосредственной близости к региону расположения маркера RM 405 (28 cM), который связан с содержанием магния.

Ключевые слова: генетика, рис, вариabельность, локусы количественных признаков, качество, молекулярное маркирование, кальций, магний.

DOI: 10.31857/S001667582311005X, **EDN:** NIVOKY

Для функционирования как животных, так и растительных организмов нужны минералы. Для человека наиболее важные из них железо, цинк, магний [1, 2]. На содержание минералов в растении влияют как генетические характеристики образца, так и внешние факторы: в первую очередь почвы, на которых оно произрастает [3–5]. Рис может быть источником кальция, магния, фосфора, селена, цинка, марганца, железа, калия. Отмечено широкое варьирование по признаку “содержание микро- и макроэлементов” как между подвидами, так и внутри видов [6].

Магний как кофактор участвует более чем в 300 ферментативных реакциях. От его концентрации зависят как производство аденозинтрифос-

фата (АТФ), так и синтез нуклеотидов и глюкозы, регуляция окисления липидов [7–10]. Катионы Mg^{2+} являются наиболее важными элементами, обеспечивающими сокращение мышц, проведение нервных импульсов и процесс формирования костей у позвоночных. Важна роль магния также в регуляции сердечно-сосудистых процессов, поддержании гомеостаза организма. Также ионы магния Mg^{2+} способны корректировать воспалительные и окислительные процессы, приводящие к сердечно-сосудистым заболеваниям (ССЗ) [11]. Повышенный риск развития сахарного диабета 2-го типа и нарушения сердечного ритма также связаны с гипомagneмией. Катионы двухвалентного магния регулируют эффективность работы

ионных каналов, определяющих поступление натрия, калия и кальция через клеточные мембраны [12, 13]. Наличие ионов магния важно в обмене ионов K^+ , Na^+ . Его недостаток приводит к избыточному выделению кальция, увеличению концентрации ионов K^+ , Na^+ внутри клеток [14–16]. Высокие концентрации кальция изменяют состав и состояние мембран эритроцитов, морфологические характеристики клетки и приводят к разрушению ядра, а также количественно изменяют состав фосфолипидов мембран эритроцитов; препятствие этим процессам могут оказать флавоноиды [17]. Ишемическая болезнь сердца сопровождается перегрузкой клеток кальцием. Магний как антагонист кальция снижает кальциевую нагрузку при ишемии миокарда, чем ограничивает размер инфаркта, спазмы артерий, уменьшает постинфарктные повреждения [18]. Защитные функции магния включают также стимуляцию процессов метаболизма в миокарде, регуляцию сопротивления сосудов и агрегации тромбоцитов [19]. Дефицит магния связан с изменением активности Na - K -АТФазы, что приводит к снижению поглощения калия и его выделению из организма [20]. Коррекция дефицита магния во многих случаях способствует нормализации содержания калия в клетке, устранению риска гиперкалиемии. Содержание магния в сыворотке крови менее 0.65 ммоль/л — один из факторов риска внезапной сердечной смерти [18–20]. Так, показано при изучении 86000 женщин, что риск летального исхода повышается на 37% [20, 21]. Ограниченное на 50% (100–120 мг) поступление ионов магния с пищей индуцирует нарушения ритма и проводимости сердца, сосудистого тонуса и углеводного обмена и повышает риск инсульта [10, 22, 23]. Для снижения риска осложнений ИБС показано ежедневное потребление 250 мг магния.

Содержание металлов влияет не только на питательную ценность растений, но и на их устойчивость к стрессам. Так, выявлено, что катионный состав изменяет оводненность цитоплазмы. Гидратация цитоплазмы положительно коррелировала с содержанием щелочных металлов, представителем которых является калий, и отрицательно с количеством щелочноземельных (кальций, магний) [11–13]. Коллоидные частицы белка, несущие отрицательный заряд, как и катионы, окружены гидратной оболочкой. Заряженные частицы с большей массой Mg^{2+} , Ca^{2+} сильнее притягиваются к отрицательно заряженным белковым молекулам, нейтрализуя их заряд, что вызывает уменьшение количества молекул воды, окружающих белок. Одновалентно заряженные частицы слабее влияют на гидратацию, повышая оводненность тканей [14–16]. Соотношение Ca^{2+}/Mg^{2+} имеет большое значение для жизнедеятельности

растений и регулирует многие процессы обмена веществ [17–19]. При анализе селекционного материала надо учитывать, что концентрация микроэлементов до 10 раз выше в зародыше, отрубях, шелушенном рисе, чем в полированном белом рисе, который обычно употребляют в пищу. Так, магния в отрубях было 5.12%, а в полированном рисе 0.51% [20–22].

Данных по локализации хромосомных регионов определяющих содержание микро- и макроэлементов в сортах риса, пока немного и они противоречивы, так как используются различные маркеры и популяции для молекулярного маркирования [23–25]. Так, три локуса, определяющих содержание железа, группой K. Anuradha с соавт. локализованы на хромосомах 1, 5, 12, C. James с соавт. выявлены на хромосомах 2 и 8, L. Kaiyang с соавт. их установили на хромосомах 1 и 11 [25–27]. Содержание кальция в работе [23] определялось локусами первой, третьей и пятой хромосом, магния — третьей. В работе [27] авторы выявили локусы, определяющие содержание кальция, на третьей хромосоме. M. Zhang с соавт. показали, что содержание магния контролировали хромосомные регионы на хромосомах 6, 10, 11 [28]. Показано, что дикие виды *Oryza rufipogon*, *O. meridionalis*, *O. nivara* и *O. longistaminata* являются источниками QTLs, повышающих содержание таких элементов как железо, цинк, марганец, магний, медь, кальций, фосфор [28–30]. Наиболее полная карта расположения локусов, определяющих качество риса, с этой точки зрения дана в работах [23, 24]. В нескольких работах также показана роль транспортеров OsZIP1 и OsHMA3 в поддержании гомеостаза микроэлементов у образцов риса [31–33]. Рассмотрены методы биофортификации селекционного материала [34–36].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе использованы как коллекционные образцы из УНУ “Коллекция ФНЦ риса”, сорта селекции ООО “Аратай”, так и перспективные и допущенные к использованию в производстве сорта риса отечественной и зарубежной селекции (48 образцов). Среди них сорта различные по качеству: короткозерные, среднезерные, крупнозерные, длиннозерные, с различными кулинарными и технологическими свойствами. Растения выращивались в сосудах на оптимальном фоне минерального питания ($N_{120}P_{60}K_{60}$), в трех повторностях, густота стояния 10 растений на один сосуд. Контролем служил сорт Флагман с той же густотой стояния. При недостатке растений или их гибели подсаживался маркер с фиолетовыми листьями.

Определение содержания кальция и магния проводилось на приборе Капель 105. Для анализа отбирали материал от 20 растений каждого образца. Определяли процент вещества в пробе. Подго-

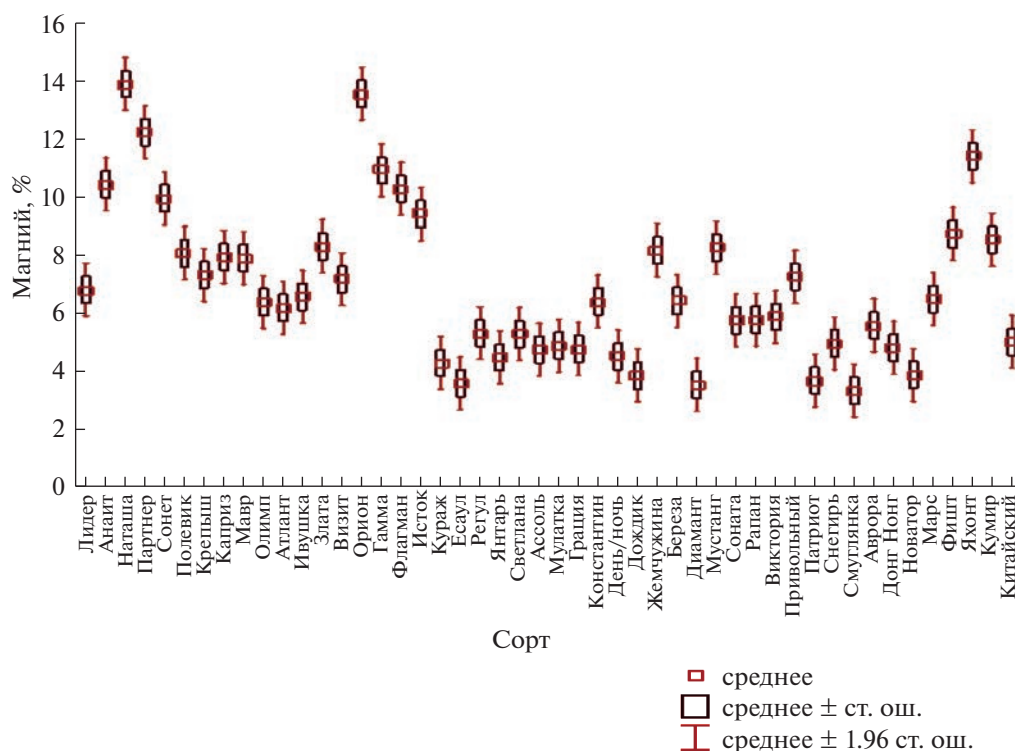


Рис. 1. Вариабельность сортов риса по содержанию магния.

товка проб для получения данных по содержанию катионов включала отбор растительного материала 1 г образца (от 20 растений), его гомогенизацию, фиксацию 10%-ным спиртом, выдержку в холодильнике одни сутки, центрифугирование при 10–15 тыс. оборотов в минуту, отбор супернатанта в чистую 2-мл пробирку до проведения анализа.

Молекулярное маркирование сортов для локализации хромосомных регионов, определяющих питательную ценность, проводили с использованием микросателлитных SSR-маркеров. Изучен полиморфизм этих сортов с использованием 58 маркеров, распределенных по семи хромосомам риса: 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10. В работе использовали маркеры как связанные с локусами, контролирующими содержание микроэлементов, так и нейтральные, распределенные по геному риса.

ДНК риса выделяли из этиолированных проростков и листьев с помощью STAB-метода в различных модификациях. Постановку полимеразной цепной реакции (ПЦР) и визуализацию продуктов амплификации проводили по методике Международного института риса [37–39].

Параметры ПЦР, использованные в данном эксперименте: 5 мин при 94°C — начальная денатурация; следующие 35 циклов: 1 мин — денатурация при 94°C, 1 мин — отжиг праймеров при 55°C, 2 мин — синтез при 72°C; последний его цикл —

7 мин при 72°C. ПЦР-смесь включала 40 нг ДНК (2 мкл), 1 мкл (1 mM) дезоксинуклеотидтрифосфатов (dNTPs), 3.7 мкл H₂O, 1 мкл буферного раствора по 0.5 мкл (5 мкM) каждого праймера, 1 мкл (1.5 ед.) Taq-полимеразы, в общем объеме 10 мкл. Продукты амплификации разделяли электрофорезом в полиакриламидном геле при напряжении 100 В. Для статистической обработки полученных данных использовали программу Statistica [40].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вариабельность образцов по содержанию катионов кальция и магния

Содержание магния в образцах риса варьировало от двух до 14% (рис. 1). В 40 образцах его содержание не превышало 10%, в десяти образцах было выше 10%, но меньше 14%, что позволяет их рекомендовать как источники по признаку, это сорта: Наташа, Орион, Партнер, Гамма. Кальций также очень важен для организма, так как он стабилизирует клеточные мембраны, при его недостатке особенно страдает корневая система. Содержание кальция варьировало в образцах риса от 0.07 до 2.33% (рис. 2). В 36 образцах его содержание не превышало 1%, в семи образцах было выше 1.5% (Полевик, Крепыш, Ивушка, Флагман, Кураж, Наташа, Смуглянка). На основании про-

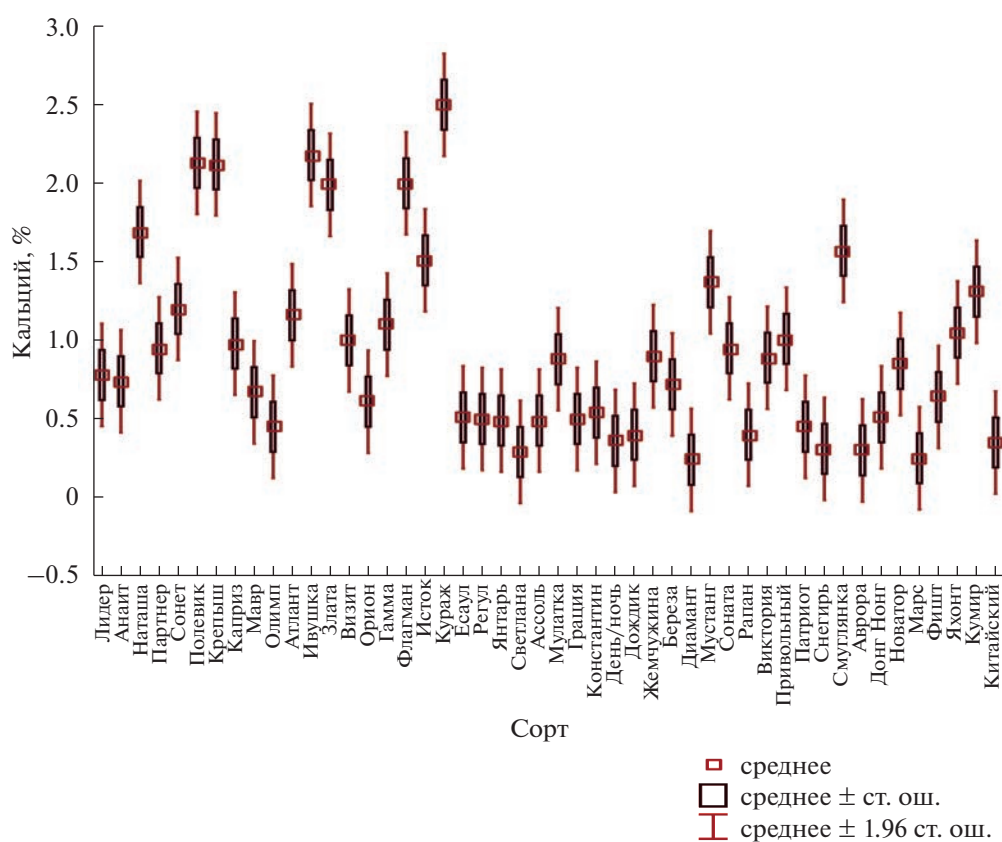


Рис. 2. Вариабельность сортов риса по содержанию кальция.

веденных исследований образцы разделили на контрастные группы по признакам: содержание магния и содержание кальция (табл. 1).

Поиск хромосомных регионов, определяющих содержание магния у отечественных сортов риса

Поиск хромосомных регионов, определяющих качество отечественных образцов, проводили с использованием 58 молекулярных маркеров, распределенных по геному риса. Данные по фенотипированию отечественных сортов риса по признаку “содержание магния” использовали для разделения их на группы с максимальным значением признака (1) и минимальным его значением (2). С помощью дисперсионного анализа установили связь между фенотипическим проявлением признака и генотипом образца.

Достоверно на уровне значимости, принятом для биологических исследований, контрастные по содержанию магния группы сортов разделяли четыре маркера: RM 542, RM 284, RM 405, RM 136 (табл. 2). Рис. 3, 4 иллюстрируют разделение

групп с использованием выделенных в исследовании маркеров. Размер продуктов амплификации при использовании различных маркеров во многих группах сортов варьирует. В первой группе мог быть меньше, чем во второй, также наблюдалась и обратная зависимость.

Локализация хромосомных регионов, определяющих содержание кальция

Данные по фенотипированию отечественных сортов риса по признаку “содержание кальция” также использовали для разделения их на группы с максимальным значением признака (1) и минимальным его значением (2) (табл. 1). Связь между фенотипическим проявлением признака и генотипом образца установили с помощью дисперсионного анализа. В табл. 2 представлены результаты дисперсионного анализа по разделению групп сортов с контрастным значением признака по содержанию кальция.

Достоверно на уровне значимости, принятом для биологических исследований, контрастные

Таблица 1. Содержание магния и кальция у разных групп сортов

Сорт	Кальций, %	Группа сортов	Сорт	Магний, %	Группа сортов
Мустанг	1.37	1	Грация	4.95	1
Исток	1.51	1	Исток	9.57	1
Смутлянка	1.57	1	Сонет	10.10	1
Наташа	1.69	1	Флагман	10.43	1
Злата	1.99	1	Анаит	10.58	1
Флагман	2.00	1	Гамма	11.06	1
Крепыш	2.12	1	Яхонт	11.54	1
Полевик	2.13	1	Партнер	12.37	1
Ивушка	2.18	1	Орион	13.69	1
Кураж	2.50	1	Наташа	14.03	1
Диамант	0.24	2	Смутлянка	3.52	2
Марс	0.25	2	Диамант	3.72	2
Светлана	0.29	2	Есаул	3.77	2
Аврора	0.30	2	Патриот	3.86	2
Снегирь	0.31	2	Дождик	4.04	2
Китайский	0.35	2	Новатор	4.06	2
День/ночь	0.36	2	Кураж	4.47	2
Дождик	0.40	2	Янтарь	4.66	2
Рапан	0.40	2	День/ночь	4.69	2
Олимп	0.45	2	Ассоль	4.92	2
НСР	0.17		НСР	0.21	

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа по разделению групп сортов с контрастным значением признака

Маркер	Сумма квадратов внутригрупповая	Средний квадрат	Сумма квадратов межгрупповая	Средний квадрат	F	p
По содержанию магния						
RM 284	1.125	1.125	0.750	0.125	9.000	0.024
RM 405	2.000	2.000	1.500	0.250	8.000	0.030
RM 136	1.125	1.125	0.750	0.125	9.000	0.024
RM 542	1.125	1.125	0.750	0.125	9.000	0.024
По содержанию кальция						
RM 154	2.408	2.408	3.467	0.578	4.168	0.087
RM 13	1.875	1.875	2.000	0.333	5.625	0.055
RM 2770	10.800	10.800	7.200	1.200	9.000	0.024
RM 3155	2.408	2.408	3.467	0.578	4.168	0.087

Примечание. F – критерий Фишера.

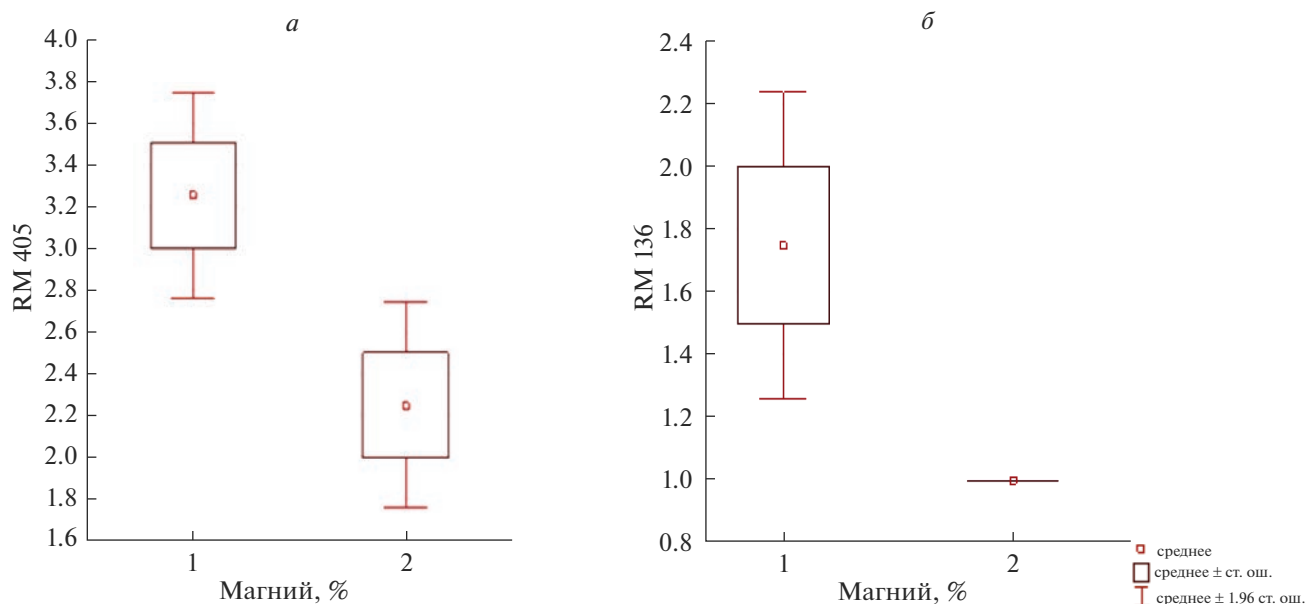


Рис. 3. Разделение контрастных по содержанию магния групп сортов с использованием маркеров RM 405, RM 136.

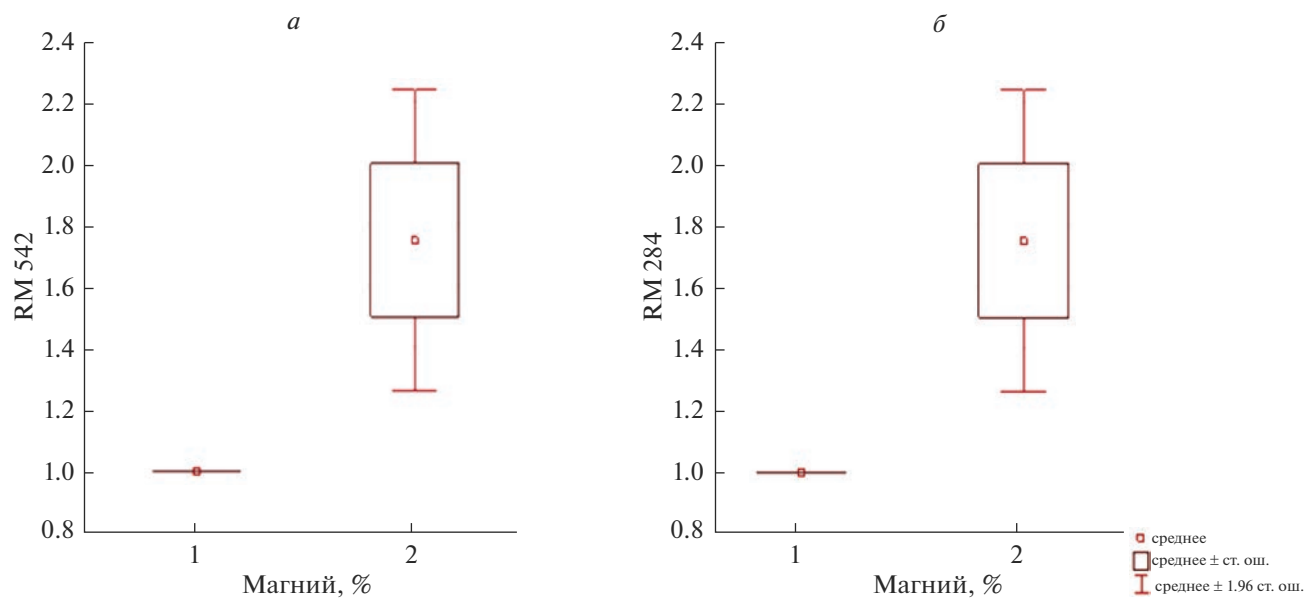


Рис. 4. Разделение контрастных по содержанию магния групп сортов с использованием маркеров RM 542, RM 284.

группы сортов разделял только маркер RM 2770. Рис. 5 иллюстрирует разделение групп с его использованием. Размер продуктов амплификации в первой группе сортов варьирует, во второй одинаков, но меньше чем в первой. Данный маркер также был сцеплен с локусом, определяющим содержание калия.

Поскольку выборка сортов в группах была небольшая, только локусы, определяющие значительные эффекты на формирование признака, могут быть выделены. Также снижает эффективность метода наличие нескольких локусов, определяющих признак, которые также влияют на фенотип образца. При снижении уровня значимости до 0.9 выде-

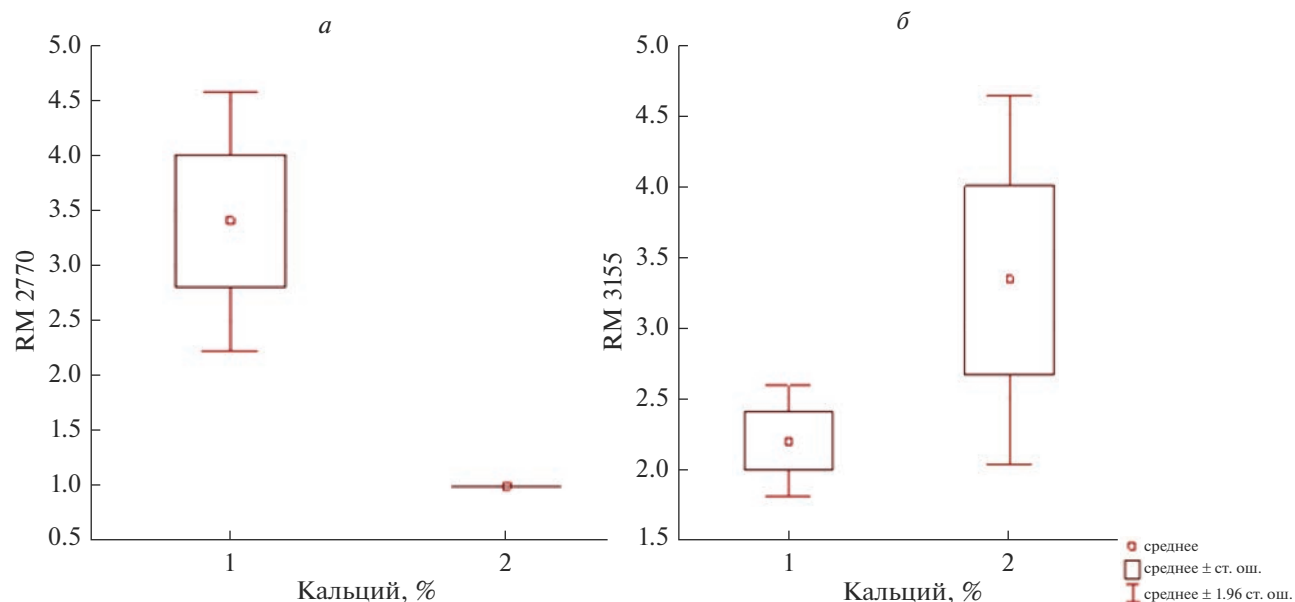


Рис. 5. Разделение контрастных по содержанию кальция групп сортов с использованием маркеров RM 2770, RM 3155.

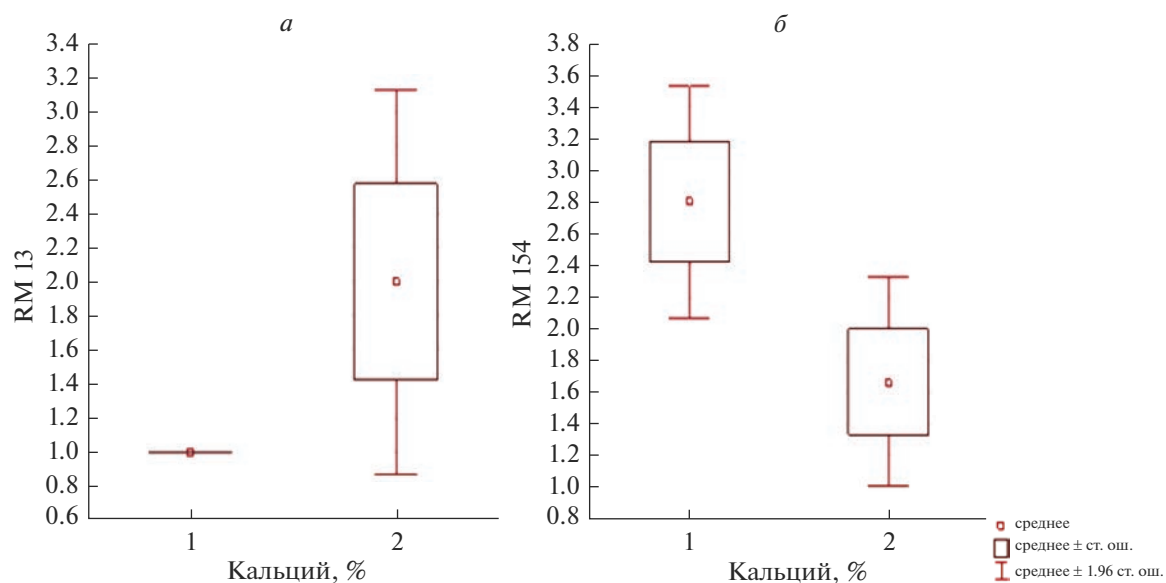


Рис. 6. Разделение контрастных по содержанию кальция групп сортов с использованием маркеров RM 13, RM 154.

ляются еще три локуса, возможно определяющих признак: RM 154, RM 13, RM 3155 (рис. 6).

В дальнейшем необходимо будет провести дополнительные исследования с большей выборкой сортов, чтобы подтвердить достоверность влияния этих локусов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Нами выделены восемь локусов, определяющих содержание микроэлементов у отечественных сортов риса. Используемый метод позволяет выделить только самые значимые локусы, так как для анализа использовались контрастные

Таблица 3. Локусы, определяющие содержание магния и кальция

SSR-маркер	Хромосома	Размер продукта амплификации (пн); положение на карте, расстояние сМ	Ассоциация с признаком
Локусы, определяющие содержание магния			
RM 136	6	101; 51	Mg ²⁺ , пролин, тирозин
RM 542	7	113; 12.7	Mg ²⁺ , пролин
RM 284	8	141; 104	Mg ²⁺
RM 405	5	110; 28	Mg ²⁺ , лейцин
Локусы, определяющие содержание кальция			
RM 3155	8	174; 119	Ca ²⁺ , лейцин
RM 154	2	183; 4.8–13.8	Ca ²⁺
RM 2770	2	184; 4.7	Ca ²⁺ , калий
RM 13	5	141; 28.6	Ca ²⁺ , пролин

группы сортов по признаку [41–43]. Три из выделенных локусов связаны с содержанием пролина. Пролин — аминокислота, во многих случаях определяющая засухоустойчивость образца. Содержание магния и кальция также определяет гидратацию тканей, что косвенно подтверждает результаты исследования. Локусы, определяющие содержание магния, расположены на хромосомах 5, 6, 7, 8, размер продуктов амплификации выделенных локусов — от 101 до 141 пары нуклеотидов. Лocus на шестой хромосоме, в районе расположения маркера RM 136 (51 сМ) был связан с содержанием сразу двух аминокислот — пролина и тирозина. На пятой хромосоме locus в районе расположения маркера RM 405 (28 сМ) был связан с содержанием лейцина (табл. 3).

Связанных с содержанием кальция было выделено четыре локуса: один на второй хромосоме (при уровне значимости 0.05) и по одному на второй, восьмой и пятой (при уровне значимости 0.09). На пятой хромосоме locus расположен (RM 13, 28.6 сМ) в непосредственной близости к региону расположения маркера RM 405 (28 сМ), который связан с содержанием магния. Возможно, эти маркеры фланкируют регион, определяющий содержание микроэлементов. Подтверждает

достоверность полученных данных верификация результата в опубликованных источниках, ранее в этом регионе на пятой хромосоме также были локализованы QTL, определяющие эти два признака [23]. Для маркирования в этих работах использовали популяцию интрогрессивных линий, полученную при гибридизации сорта Teging и дикого вида риса *Oryza rufipogon*. На восьмой хромосоме, в районе близком к расположению маркеров, выявленных нами, также выявили locus, определяющий содержание микроэлементов. На второй хромосоме разными авторами также были выявлены локусы, определяющие содержание различных микроэлементов. В работе A. Garcia-Oliveira и соавт. [23] — это железо и марганец; C. James и соавт. [25] выявили locus, определяющий содержание железа. В работах [24, 28] этот регион также определял содержание меди и железа. То есть полученные нами данные подтверждаются данными других исследователей, полученными на других популяциях. Возможно, в этих регионах расположены кластеры генов, определяющие качество и содержание микроэлементов. Полученные данные позволят более эффективно переносить гены, определяющие качество образ-

цов, как из диких видов риса, так и перспективных селекционных образцов.

Работа поддержана грантом Фонда содействия инновациям № 4654ГС2/48601.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием в качестве объекта животных.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием в качестве объекта людей.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончарова Ю.К., Харитонов Е.М., Малюченко Е.А., Бушман Н.Ю. Молекулярное маркирование признаков, определяющих качество зерна у российских сортов риса // Вавил. журн. генетики и селекции. 2018. Т. 26. № 1. С. 79–87. <https://doi.org/10.18699/VJ18.334>
2. Фотев Ю.В., Пивоваров В.Ф., Артемьева А.М. и др. Концепция создания Российской национальной системы функциональных продуктов питания // Вавил. журн. генетики и селекции. 2018. Т. 22. № 7. С. 776–783. <https://doi.org/10.18699/VJ18.421>
3. Харитонов Е.М., Гончарова Ю.К. Взаимосвязь между устойчивостью к высоким температурам и стабильностью урожаев у риса // Аграрная Россия. 2008. Т. 3. № 1. С. 2–24. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2008-3-22-24>
4. Харитонов Е.М., Гончарова Ю.К., Иванов А.Н. Применение кластерного анализа для разделения сортов риса по реакции на изменение условий среды // Вестник Росс. акад. с.-х. наук. 2014. № 6. С. 32–35.
5. Liu X.S., Feng S.J., Zhang B.Q. et al. OsZIP1 functions as a metal efflux transporter limiting excess zinc, copper and cadmium accumulation in rice // BMC Plant Biol. 2019. № 19. P. 283. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1899-3>
6. Fan F., Long W., Liu M. et al. Quantitative trait locus mapping of the combining ability for yield-related traits in wild rice *Oryza longistaminata* // J. Agric. Food Chem. 2019. № 67. P. 8766–8772. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b02224>
7. Iseri L.T., Allen B.J., Ginkel M.L., Brodsky M.A. Ionic biology and ionic medicine in cardiac arrhythmias with particular reference to magnesium // Am. Heart J. 1992. V. 123. № 5. P. 1404–1409. [https://doi.org/10.1016/0002-8703\(92\)91059-a](https://doi.org/10.1016/0002-8703(92)91059-a)
8. Mubagwa K., Gwanyanya A., Zakharov S., Macianskiene R. Regulation of cation channels in cardiac and smooth muscle cells by intracellular magnesium // Arch. Biochem. Biophys. 2007. V. 458. № 1. P. 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2006.10.014>
9. Qu X., Jin F., Hao Y. et al. Magnesium and the risk of cardiovascular events: A meta-analysis of prospective cohort studies // PLoS One. 2013. V. 8. № 3. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057720>
10. Сыркин А.Л., Салагаев Г.И., Сыркина Е.А., Лысенко А.В. Преимущества оротата магния для коррекции магни-дефицитных состояний у больных с различными формами нарушений ритма сердца // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2019. Т. 12. № 4. С. 308–313. <https://doi.org/10.17116/kardio201912041308>
11. Sheehan J.P., Seelig M.S. Interactions of magnesium and potassium in the pathogenesis of cardiovascular disease // Magnesium. 1984. V. 3. № 4–6. P. 301–314. Corpus ID: 2095870.
12. Leor J., Kloner R.A. An experimental model examining the role of magnesium in the therapy of acute myocardial infarction // Am. J. Cardiology. 1995. V. 75. № 17. P. 1292–1293. [https://doi.org/10.1016/s0002-9149\(99\)80787-5](https://doi.org/10.1016/s0002-9149(99)80787-5)
13. Paravicini T.M., Chubakov V., Gudermann T. TRPM7: A unique channel involved in magnesium homeostasis // Intern. J. Biochem. Cell Biol. 2012. V. 44. № 8. P. 1381–1384. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2012.05.010>
14. Whang R., Welt L.A. Observations in experimental magnesium depletion // J. Clin. Investigation. 1963. V. 42. № 3. P. 305–313. <https://doi.org/10.1172/JCI104717>
15. Solomon R. The relationship between disorders of K⁺ and Mg²⁺ homeostasis // Semin Nephrol. 1987. V. 7. № 1. P. 253–262.
16. Weiner I.D., Wingo C.S. Hypokalemia: Consequences, causes, and correction // J. Am. Soc. Nephrology. 1997. V. 8. № 7. P. 1179–1188. <https://doi.org/10.1681/ASN.V871179>
17. Сюсин И.В. Влияние ионов Ca²⁺ на фосфолипидный состав, состояние и морфологические характеристики эритроцитов: Дисс. ... канд. биол. наук. Саранск, 2021. 123 с.
18. Wong N.L., Sutton R.A., Navichak V. et al. Enhanced distal absorption of potassium by magnesium-deficient rats // Clin. Science. 1985. V. 69. № 5. P. 625–630. <https://doi.org/10.1042/cs0690625>
19. Shechter M. Magnesium and cardiovascular system // Magnesium Res. 2010. V. 23. № 2. P. 60–72. <https://doi.org/10.1684/mrh.2010.0202>
20. Громова О.А., Торшин И.Ю., Калачева А.Г. и др. О некоторых ролях калия и магния в терапевтической практике // Лечебное дело. 2019. Т. 2. С. 21–31. <https://doi.org/10.24411/2071-5315-2019-12108>
21. Song Y., He K., Levitan E.B. et al. Effects of oral magnesium supplementation on glycaemic control in Type 2 diabetes: A meta-analysis of randomized double-blind controlled trials // Diabet Medicine. 2006. V. 23. № 10. P. 1050–1056. <https://doi.org/10.1111/j.1464-5491.2006.01852.x>

22. Ohira T., Peacock J.M., Iso H. et al. Serum and dietary magnesium and risk of ischemic stroke: the atherosclerosis risk in communities study // *Am. J. Epidemiology*. 2009. V. 169. № 12. P. 1437–1444. <https://doi.org/10.1093/aje/kwp071>
23. Garcia-Oliveira A.L., Tan L., Fu Y., Sun C. Genetic identification of quantitative trait loci for contents of mineral nutrients in rice grain // *J. Integrative Plant Biol.* 2009. V. 51. № 1. P. 84–92. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00730.x>
24. Mahender A., Anandan A., Kumar S. et al. Rice grain nutritional traits and their enhancement using relevant genes and QTLs through advanced approaches // *Springer Plus*. 2016. V. 5. № 1. P. 2086. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3744-6>
25. James C.R., Huynh B.L., Welch R.M. et al. Quantitative trait loci for phytate in rice grain and their relationship with grain micronutrient content // *Euphytica*. 2007. V. 154. № 3. P. 289–294. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9211-7>
26. Anuradha K., Agarwal S., Rao Y.V. et al. Mapping QTLs and candidate genes for iron and zinc concentrations in unpolished rice of Madhukar * Swarna RILs // *Gene*. 2012. V. 508. № 2. P. 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2012.07.054>
27. Kaiyang L., Lanzhi L., Xingfei Z. et al. Quantitative trait loci controlling Cu, Ca, Zn, Mn and Fe content in rice grains // *J. Genet.* 2008. V. 87. № 3. P. 305–310. <https://doi.org/10.1007/s12041-008-0049-8>
28. Zhang M.W., Guo B.J., Peng Z.M. Genetic effects on Fe, Zn, Mn and P contents in Indica black pericarp rice and their genetic correlations with grain characteristics // *Euphytica*. 2004. V. 135. № 3. P. 315–323.
29. Гончарова Ю.К., Гончаров С.В. Изучение и использование дикорастущего африканского *Oryza longistaminata* в качестве донора признаков аллогамии в селекции культурного риса на гетерозис // В сб. тезисов межд. конф. “Генетические ресурсы культурных растений. Проблемы мобилизации, инвентаризации, сохранения и изучения генофонда важнейших сельскохозяйственных культур для решения приоритетных задач селекции”, 13–16 ноября 2001 г. СПб., 2001. С. 253–255.
30. Liu X., Fan F., Liu M. Quantitative trait loci mapping of mineral element contents in brown rice using backcross inbred lines derived from *Oryza longistaminata* // *Front. Plant Sci.* 2020. V. 11. P. 1229. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01229>
31. Liu X.S., Feng S.J., Zhang B.Q. et al. OsZIP1 functions as a metal efflux transporter limiting excess zinc, copper and cadmium accumulation in rice // *BMC Plant Biol.* 2019. V. 19. P. 283. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1899-3>
32. Cai H., Huang S., Che J. et al. The tonoplast-localized transporter OsHMA3 plays an important role in maintaining Zn homeostasis in rice // *J. Exp. Bot.* 2019. V. 70. P. 2717–2725. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz091>
33. Wu Q., Liu C., Wang Z. et al. Zinc regulation of iron uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.): Implication from stable iron isotopes and transporter genes // *Environ. Pollut.* 2022. V. 297. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118818>
34. D’Amato R., Fontanella M. C., Falcinelli B. et al. Selenium biofortification in rice (*Oryza sativa* L.) sprouting: Effects on Se yield and nutritional traits with focus on phenolic acid profile // *J. Agric. Food Chem.* 2018. V. 66. P. 4082–4090. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00127>
35. He J., Rossner N., Hoang M. et al. Transport, functions, and interaction of calcium and manganese in plant organellar compartments // *Plant Physiol.* 2021. V. 187. P. 1940–1972. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab122>
36. Adeva C., Yun Y.-T., Shim K.-C. et al. QTL mapping of mineral element contents in rice using introgression lines derived from an interspecific cross // *Agronomy*. 2023. V. 13. P. 76. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010076>
37. Гончарова Ю.К., Харитонов Е.М. Генетический контроль признаков, связанных с усвоением фосфора у сортов риса (*Oryza sativa* L.) // Вавил. журн. генетики и селекции. 2015. Т. 19. № 2. С. 197–204. <https://doi.org/10.18699/VJ15.025>
38. Fan F., Long W., Liu M. et al. Quantitative trait locus mapping of the combining ability for yield-related traits in wild rice *Oryza longistaminata* // *J. Agric. Food Chem.* 2019. V. 67. P. 8766–8772. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b02224>
39. Jin J., Long W., Wang L. et al. QTL mapping of seed vigor of backcross inbred lines derived from *Oryza longistaminata* under artificial aging // *Front. Plant Sci.* 2018. № 9. P. 1909. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01909>
40. Goncharova Yu.K., Goncharov S.V., Chicharova E.E. Localization of chromosome regions controlling high photosynthetic potential in Russian rice cultivars // *Russ. J. Genet.* 2018. V. 54. № 7. P. 796–804. <https://doi.org/10.1134/S0016675818070032>
41. Butardo V.M., Jr., Sreenivasulu N., Juliano B.O. Improving rice grain quality: State-of-the-art and future prospects // *Methods Mol. Biol.* 2019. V. 19. P. 55. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8914-0_2
42. Birla D.S., Kapil Malik, Manish Sainger et al. Progress and challenges in improving the nutritional quality of rice (*Oryza sativa* L.) // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2017. V. 57. P. 2455–2481. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1084992>
43. Zhang L., Ma B., Bian Z. et al. Grain size selection using novel functional markers targeting 14 genes in rice // *Rice*. 2020. V. 13. P. 63. <https://doi.org/10.1186/s12284-020-00427-y>

Localization of Chromosomal Regions Determining Magnesium and Calcium Content in Rice Varieties

J. K. Goncharova^{a, c, *}, V. V. Simonova^a, S. V. Goncharov^b, and N. A. Ochkas^c

^a*Federal Scientific Center of Rice, Krasnodarskiy krai, p. Belozerny, 350921 Russia*

^b*Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044 Russia*

^c*“Aratai” LLC, Participant of Skolkovo Innovation Center, Moscow, 143026 Russia*

^{*}*e-mail: yuliya_goncharova_20@mail.ru*

There has been a wide variation in the content of micro and macro elements, both between subspecies and within rice species and varieties. Magnesium as a cofactor is involved in more than 300 enzymatic reactions and is necessary for growth and development of both plants and humans. It affects carbohydrate and protein metabolism. Both adenosine triphosphate (ATP) production, nucleotide and glucose synthesis, and lipid oxidation regulation depend on its concentration. Calcium is also essential for the formation of cell wall structure and cell division. High concentrations of calcium change the composition and condition of red blood cell membranes and cell morphological characteristics. At the same time the variability in signs of domestic rice varieties has not yet been studied. There have been no studies on the localization of chromosomal regions responsible for the formation of traits of magnesium and calcium content in rice samples. Wide variation in calcium content (0.07–2.33%) and magnesium content in rice samples (2–14%) was established. Contrasting groups of varieties and sources by signs were identified. A search for chromosomal regions determining the quality of domestic samples was carried out using 58 molecular markers distributed across the rice genome (SSR). The data on phenotyping of native rice varieties by quality signs were used to divide them into groups with maximum trait value (1) and minimum trait value (2). The relationship between phenotypic manifestation of the trait and the genotype of the sample was established: by means of analysis of variance. Eight loci determining magnesium and calcium content in native rice varieties – were identified. The loci determining magnesium content are located on chromosomes 5, 6, 7, 8. Four loci associated with calcium content were identified two on the second chromosome and one each on the eighth and fifth chromosomes. On the fifth chromosome, it is located (RM 13, 28.6 cM) in close proximity to the RM 405 marker region (28 cM), which is connected with magnesium content.

Keywords: genetics, rice, variability, quantitative trait loci, molecular marking, quality, calcium, magnesium.