

ЭКОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ КАЧЕСТВА У ОБРАЗЦОВ КОЛЛЕКЦИИ *Brassica rapa* L. ВИР*

А.М. АРТЕМЬЕВА¹, А.Е. СОЛОВЬЕВА¹, Ф.А. БЕРЕНСЕН¹, Н.В. КОЧЕРИНА¹,
Ю.В. ЧЕСНОКОВ²

Особенность химического состава культур вида *Brassica rapa* L. (высокое содержание воды и низкое — жиров) обуславливает низкую калорийность капустных растений. Для них характерно высокое содержание углеводов и белков, включающих все незаменимые аминокислоты. Биохимический состав растений в пределах вида *B. rapa* сильно варьирует. Нами впервые проведена многофакторная комплексная оценка морфологических и биохимических признаков качества, обуславливающих потребительскую ценность растений из стержневой коллекции *Brassica rapa* L. Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР, 96 образцов) в разных эколого-географических зонах (Южный Китай и Ленинградская обл.) в полевых условиях и в теплице. С помощью отобранных SSR (simple sequence repeats) маркеров, находящихся в неравновесном сцеплении с QTL морфологических и биохимических признаков, впервые осуществлен молекулярно-генетический анализ геномов различных (листовых, корнеплодных и масличных) форм у образцов из стержневой коллекции *B. rapa* ВИР, в результате чего среди культур вида выявлены новые генетические источники признаков качества. При изучении особенностей проявления некоторых признаков, обуславливающих потребительскую ценность растений вида *B. rapa*, установлено, что различия по морфометрическим показателям образцов (длина и ширина листовой пластинки, размер черешка, опушенность, окраска) при выращивании в полевых условиях Южного Китая и Ленинградской области в среднем невелики, в то время как в теплице при загущенной посадке размеры листовой пластинки уменьшаются (у пекинской, китайской, ноздреватой капусты, репы, культурной сурепицы в полевых условиях листья были на 5-12 см длиннее и шире). По биохимическим признакам в полевых условиях обнаружены значимые и высокозначимые корреляции сухое вещество (СВ)—аскорбиновая кислота (АК) ($r = 0,51$, $p < 0,05$), СВ—хлорофилл а (Ха) ($r = 0,59$, $p < 0,05$), СВ—каротиноиды (Кд) ($r = 0,55$, $p < 0,05$), СВ—каротины (Ка) ($r = 0,67$, $p < 0,05$), СВ— β -каротин (β -К) ($r = 0,59$, $p < 0,05$), СВ—белок (Б) ($r = -0,49$, $p < 0,05$); Ха—Хб ($r = 0,93$, $p < 0,001$), Ха—Кд ($r = 0,59$, $p < 0,05$), Ха—Ка ($r = 0,49$, $p < 0,05$) Ха— β -К $r = 0,99$ ($p < 0,001$); Хб— β -К ($r = 0,92$, $p < 0,001$); Кд—Ка ($r = 0,49$, $p < 0,05$), Кд— β -К ($r = 0,63$, $p < 0,05$); Ка— β -К ($r = 0,49$, $p < 0,05$). В теплице соответствующие значения r были следующими: СВ—АК $r = -0,59$ ($p < 0,05$), СВ—Хб $r = 0,58$ ($p < 0,05$), СВ—Кд $r = -0,53$ ($p < 0,05$), СВ—Ка $r = 0,71$ ($p < 0,001$); АК—Хб $r = -0,59$ ($p < 0,05$), АК—Кд $r = 0,83$ ($p < 0,001$), АК—Б $r = 0,58$ ($p < 0,05$); Ха—Хб $r = 0,74$ ($p < 0,001$), Ха—Ка $r = 0,67$ ($p < 0,05$), Ха— β -К $r = 0,95$ ($p < 0,001$); Хб—Кд $r = -0,48$ ($p < 0,05$), Хб—Ка $r = 0,87$ ($p < 0,001$), Хб— β -К $r = 0,64$ ($p < 0,05$); Ка— β -К $r = 0,63$ ($p < 0,05$). Выявлены новые генетические источники изучаемых биохимических признаков (образцы полукочанной пекинской капусты Сю-бай-коу и Дунганская, китайской капусты Майская и Ching Pang Ju Tsai, выделившийся особенно высоким содержанием хлорофиллов и каротина) с показателями в поле и в теплице по СВ — соответственно 5,44-7,03 и 4,20-5,40 % (выше среднего значения для культуры), Б — 12,61-24,66 и 24,12-33,23 %, АК — 32,56-46,46 и 30,00-61,47 мг/100 г, Ха — 33,35-110,64 и 53,82-95,99 мг/100 г, Хб — 12,20-53,80 и 17,89-44,78 мг/100 г, β -К — 1,80-6,75 и 3,00-6,04 мг/100 г. Подтверждено, что найденные SSR-маркеры BRMS051, KS51082, BRMS043 и KS50200 ценных морфологических и биохимических признаков могут быть использованы для скрининга коллекционного и селекционного материала. Кроме того, полученные оригинальные результаты позволяют вплотную подойти к практическому осуществлению ассоциативного картирования и идентификации конкретных генетических детерминант, определяющих проявление изучаемых морфологических и биохимических хозяйственно ценных и экономически значимых признаков качества на основе использования уникального коллекционного материала *B. rapa*, сохраняемого в ВИР.

Ключевые слова: *Brassica rapa*, морфологические и биохимические признаки качества, молекулярные маркеры, скрининг коллекции.

Репа (*Brassica rapa* L.) — широко распространенный на Земном шаре вид, который включает экономически важные скороспелые и продуктив-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-04-00128-а.

ные культуры (масличные, овощные, кормовые) с ценным химическим составом. Низкое содержание жиров и высокое — воды делает их малокалорийными, а значительное количество биологически активных веществ (витаминов, ферментов и др.) у культурных представителей вида положительно влияет на здоровье человека, стимулирует иммунную систему и препятствует развитию сердечно-сосудистых заболеваний. Во Всероссийском институте генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР) ведется поиск и привлечение в коллекции образцов *B. rapa* с улучшенными морфологическими и биохимическими признаками качества. Генетический анализ этих важных для человека количественных признаков (quantitative trait loci — QTL) возможен благодаря наличию у культур вида значительной генетической изменчивости. Биохимический состав растений в пределах вида *B. rapa* сильно варьирует (1-5). В последнее десятилетие установлены особенности накопления основных метаболитов, в том числе биологически активных веществ, у ранее малоизученных восточноазиатских капустных культур *B. rapa*, включая различные сортоформы (6, 7). Объяснение широчайшей изменчивости морфологических признаков у *B. rapa* предложено К. Lin с соавт. (8), обнаружившими уникальные гены у трех морфотипов *B. rapa* — корнеплодной репы и короткостадийной формы, геномы которых секвенировали и сравнили с геномом кочанной пекинской капусты.

Ранее (9-12) мы картировали локусы хромосом, отвечающие за проявление семи морфологических и пяти биохимических признаков качества в популяциях линий удвоенных гаплоидов листовых, корнеплодных и масличных культур вида *B. rapa* L. Всего (с учетом контроля одним локусом одних и тех же признаков в разных условиях выращивания или нескольких признаков одновременно) было картировано 140 QTL, детерминирующих формирование указанных хозяйственно значимых свойств у линий удвоенных гаплоидов *B. rapa* в полевых условиях и при выращивании в теплице. Установлены молекулярные маркеры, генетически сцепленные с изучаемыми QTL, дискутируется блочная геномная структура построения генетических компонент (локусов хромосом и групп сцепления), вовлеченных в экспрессию морфологических и биохимических признаков качества. Однако достигнутые результаты до конца не раскрывают характер наследования и молекулярно-генетический контроль этих признаков, представляющих интерес для изучения генетического разнообразия у вида *B. rapa*.

Отличительная особенность настоящей работы заключается в том, что впервые проведена многофакторная комплексная оценка морфологических и биохимических признаков качества, которые обуславливают потребительскую ценность растений *B. rapa*. Анализ геномов различных форм *B. rapa* с использованием молекулярно-генетических маркеров, находящихся в неравновесном сцеплении с QTL морфологических и биохимических признаков, позволил выявить перспективные образцы — генетические источники для селекции на качество у *B. rapa*. При этом найденные молекулярные маркеры могут служить эффективным инструментом при массовом скрининге образцов коллекции и селекционного материала.

Цель работы заключалась в морфологической, биохимической и молекулярно-генетической оценке коллекции *Brassica rapa* L. ВИР в различных эколого-географических зонах в полевых условиях и в теплице.

Методика. Исследовали 96 образцов разного происхождения из стержневой коллекции ВИР, отражающей ботаническое разнообразие вида *B. rapa*. Использовали таксономическое деление по С.Е. Specht и А. Diederichsen (13), за исключением выделения ssp. *sylvestris* (Lam.) Janchen в отдельный от ssp. *oleifera* подвид. Все образцы оценивали в многолетних полевых испы-

таниях в Пушкинском филиале ВИР (г. Санкт-Петербург) и на Южно-китайской опытной станции фирмы «Enza Zaden» (г. Гуанчжоу, провинция Гуандун, Китай) в 2010 году, а также в 2013–2016 годах в условиях зимней теплицы (Пушкинский филиал ВИР). Схема посева в полевых тестах 70×30 см, в теплице — 25×20 см. Морфологическое описание и биохимическую оценку растений проводили по представленным ранее методикам (3, 4, 14, 15), используя 20 растений каждого образца.

ДНК выделяли из молодых зеленых листьев растений по методике Д.Б. Дорохова и Э. Клоке (16). Молекулярно-генетический скрининг образцов методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) проводили согласно описанному ранее протоколу (17). В реакционную смесь (25 мкл) вносили 10× инкубационный буфер (2,5 мкл), 0,5 мкл каждого dNTP (10 мМ), по 1 мкл праймера (10 пмоль/мкл), 0,5 мкл Taq ДНК-полимеразы (5 ед/мкл) («Сибэнзим», Россия) и 20 нг геномной ДНК. ПЦР-амплификацию осуществляли в ДНК-термоциклере («Bio-Rad», США) с индивидуальной программой для каждого типа маркеров в соответствии с базой данных генетических маркеров овощных культур (<http://vegmarks.nivot.affrc.go.jp/>). Результаты визуализировали при помощи ДНК-электрофореза в 1,8 % агарозном геле с окрашиванием бромистым этидием. Для регистрации паттернов использовали документационную систему («Bio-Rad», США).

Данные обрабатывали с помощью программы Statistica 6.0 («StatSoft Inc.», США). Использовали уровень значимости $p \leq 0,05$.

Результаты. Образцы коллекции *B. rapa* (табл. 1) оценивали в условиях теплицы (посев 1 февраля) и в полевых тестах (посев в Гуанчжоу 25 мая, в Пушкине 25 июня) по ряду морфологических признаков качества, обуславливающих продуктивность и потребительскую привлекательность растений: длина, ширина, окраска, опушенность, характер поверхности ткани листовой пластинки, а также длина и ширина черешка наиболее развитого листа среднего яруса.

1. Список образцов стержневой коллекции вида *Brassica rapa* L. из мировой коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР)

Подвид, разновидность	Сортотип	Номер в каталоге ВИР	Название	Происхождение		
ssp. <i>pekinensis</i> (Lour.) Hanelt (пекинская)	Дунганская	139	Дунганская	Казахстан		
	Сяо	53	Местный	Казахстан		
Чиримен	Нагасаки	74	Сяо-бай-коу	Китай		
		89	Доу-образная раннеспелая	Китай		
		100	Hikoshima spring	Япония		
		238	Nagoya Market	Япония		
		Шантунг	58	Би-це	Киргизия	
			210	Kiriba Santo	Япония	
			108	Местный	Китай	
			132	Kasin	Япония	
		Касин	Чосен	247	Хасинбечу	Корея
				122	Лен-син-дзон	Китай
Аити	Нозаки	207	Chosen	Япония		
		63	Местный	Китай		
Нозаки	Кага	131	Aichi	Япония		
		111	Nozaki early	Япония		
Кага	Хоторен	327	Nozaki Nagumaki	Япония		
		103	Kaga	Япония		
Хоторен	Чи-фу	88	Цзюй-син-бао-тоу-бай-цай	Китай		
		127	Hotoren	Япония		
Чи-фу	Кенсин	48	Wong-Bok	Нидерланды		
		110	Matsushima	Япония		
Кенсин	Гранат	222	Kensin	Япония		
		164	Michihli	Канада		
Гранат	Да-цин-коу	71	Хэ-тоу-вень	Китай		
		56	Да-цин-коу	Китай		
		128	Цужита	Япония		
		198	Местный	Китай		

ssp. <i>chinensis</i> (L.) Hanelt (китайская)	Пиорбай	75	Пиорбай	Китай	
	Сьюсман	77	Сьюсман	Китай	
var. <i>rosularis</i> (Tsen & Lee) Hanelt (розеточная)	Тайсай	Вр.930	Майская 8	Китай	
		46	Тай-на	Россия	
	106	Янчай	Китай		
	Ю-тсай (var. <i>utilis</i>)	214	Nicanme Jukijiro Taisai	Япония	
		195	Местный	Китай	
	203	Ching Pang Ju Tsai	Китай		
	84	Хэе-ю-та-цай	Китай		
	129	Та-гу-цай	Китай		
	var. <i>narinosa</i> (Bailey) Hanelt (ноздреватая)	Хризантемум	154	Chrysanthemum heart	Китай
	213	Bitamin na	Япония		
var. <i>purpuraria</i> (Bailey) Bailey (пурпурная)		391	Xing Yang	Китай	
ssp. <i>nipposinica</i> (Bailey) Hanelt (японская)	Мибуна	115	Mibuna	Япония	
	Мизуна	159	Mizuna	Япония	
		241	Shiroguki Kyona	Япония	
ssp. <i>rapa</i> L. f. <i>Komatsuna</i> (листовая репа комацуна)	Комацуна	215	Uzuki Komatsuna	Япония	
		242	Goseki Late	Япония	
	Курона	264	Kurona	Япония	
Японские листовые овощи	Мана	372	Bansei Mana	Япония	
	Сирона	98	Osaka Market	Япония	
		217	Okute Osaka Shirona	Япония	
	Хиросимана	335	Hiroshimana	Япония	
Стабильные гибриды между подвидами		96	Шантай	Китай	
		302	Гурин Дэбюю	Япония	
		331	White Long Petiole	Япония	
		436	Benrina	Япония	
ssp. <i>rapa</i> L. (репа корнеплодная)	Китайский	163	Местный	Китай	
	Остерзундомский	307	Остерзундомский	Россия	
	Бортфельдский	385	Бортфельдский	Украина	
	Карельская	738	Карельская	Россия	
	Грбовская	821	Грбовская	Россия	
	Миланская белая	826	Миланская белая	Россия	
	Петровская	830	Петровская	Россия	
	Тельтовский	894	Тельтовская	Германия	
	Норфолькский				
	фиолетовоголовый	984	Норфолькский	Франция	
	Вольнский	1050	Вольнский	Украина	
	Золотой шар	1283	Золотой шар	Нидерланды	
ssp. <i>oleifera</i> (DC.) Metzger f. <i>annua</i> (сурепица яровая)		68	Местный	Китай	
		1	Kun Min ai u-zai	Китай	
		2	Hue Zin u-zai	Китай	
		11	Gute	Финляндия	
		13	Местный	Аргентина	
		25	Zsjan Su U uan-uzai 5082	Китай	
		63	Pahsi	Индия	
		106	Lotni mustard	Индия	
		108	Arlo	Швеция	
		114	Local (tetraploid)	Пакистан	
		163	LGL	Пакистан	
		192	Mustard	Непал	
		248	Local	Испания	
		251	Vat-cawte	Танзания	
		301	BHLS	Непал	
		339	Jui-cai-tai	Китай	
		374	Local 88/47	Бутан	
ssp. <i>oleifera</i> (DC.) Metzger f. <i>biennis</i> (сурепица озимая)		166	Root mustard	Тунис	
ssp. <i>dichotoma</i> (Roxb.) Hanelt (коричневый сарсон)		337	U-zai-zsi	Китай	
		53	Local toria	Индия	
		100	Local	Непал	
		135	Ds 17	Индия	
		161	Toria selection	Пакистан	
		205	Sarson	Пакистан	
ssp. <i>trilocularis</i> (Roxb.) Hanelt (желтый сарсон)		131	Type 1	Индия	
		188	Palton sarson 66	Индия	
		299	Sangam	Индия	
		338	Chen-du-ai-u-zai	Китай	
ssp. <i>sylvestris</i> (Lam.) Janchen (сурепица лесная дикая)		176		Италия	
		218	Nabo silvestre	Перу	

Установлено, что средняя по коллекции длина и ширина листовых пластинок в полевых условиях в Китае и при выращивании в Пушкин-

ском филиале ВИР различались несущественно, тогда как в теплице размеры листовой пластинки оказались значительно меньше (табл. 2). В то же время в условиях Китая размеры листовой пластинки были существенно больше у китайской капусты, ноздреватой и пурпурной капусты (все культуры южно-китайского происхождения), а также у корнеплодной репы; незначительно больше — у южно-китайской розеточной капусты и сурепицы. Размеры листовой пластинки у пекинской капусты и листовой репы, а также длина пластинки у японской капусты оказались больше при выращивании в условиях Ленинградской области. Очевидно, это вызвано, очень высокими летними температурами в Южном Китае (35 °С и выше), лимитирующими быстрый рост вегетативных органов у некоторых культур. У пекинской капусты размеры листовой пластинки достоверно превышали средние по популяции: в полевых тестах в Китае, Пушкине и в условиях теплицы длина составляла соответственно 38,22±1,61; 41,82±1,03 и 31,87±0,71 см, ширина — 19,33±0,80; 25,02±0,78 и 16,02±0,45 см. Размер листа у листовой репы в полевых условиях также превышал средние значения по коллекции, в теплице — не отличался от среднего для вида. Листовая пластинка у культурной сурепицы была значительно меньше (на 30-40 % независимо от условий выращивания), чем в среднем по популяции, а дикая сурепица и розеточная капуста выделялись наименьшими размерами. Листовые пластинки у пекинской, китайской, ноздреватой капусты, репы, культурной сурепицы в полевых условиях были на 5-12 см длиннее и шире, чем в теплице, у розеточной и японской капусты, а также дикой сурепицы в тех же условиях — практически не различались по размеру.

2. Средние размеры листа у культур вида *Brassica rapa* L. в контрастных условиях

Культура	Длина, см			Ширина, см		
	полевой опыт		П, теплица	полевой опыт		П, теплица
	К	П		К	П	
Л и с т о в а я п л а с т и н к а						
Пекинская капуста	38,22±1,61	41,82±1,03	31,87±0,71	19,33±0,80	25,02±0,78	16,02±0,45
Китайская капуста	26,10±2,58	21,36±1,08	16,13±1,16	19,20±1,30	16,33±1,06	11,18±0,58
Розеточная капуста	14,50±0,50	12,30±2,00	13,93±1,11	11,50±0,50	10,45±1,05	10,05±1,03
Ноздреватая и пурпурная капуста	24,70±1,86	21,50±1,98	16,73±0,42	22,30±2,61	18,60±0,38	11,17±0,42
Японская капуста	18,00±3,06	24,63±2,20	24,10±7,03	9,67±2,40	9,50±3,10	8,37±1,19
Репа	24,78±3,14	19,12±1,39	19,10±0,83	19,00±1,78	12,26±0,91	15,95±0,95
Листовая репа	27,58±2,09	33,84±2,63	21,79±1,01	18,75±1,22	23,51±1,32	12,45±0,67
Сурепица	19,04±1,13	16,67±0,52	12,75±0,48	13,72±0,64	12,96±0,47	10,38±0,40
Сурепица дикая	13,50±0,50	11,50±1,00	14,03±2,01	11,50±0,50	9,50±0,50	11,85±1,86
Среднее по коллекции	25,75±1,09	26,34±1,20	20,63±0,85	16,92±0,53	17,61±0,67	12,85±0,35
НСР ₀₅	3,31	3,62	2,55	1,60	2,04	1,05
Ч е р е ш о к						
Китайская капуста	16,00±1,79	15,41±1,74	12,35±1,35	3,33±1,39	3,39±0,23	2,06±0,09
Розеточная капуста	9,00±2,01	10,50±0,10	12,28±1,65	2,20±0,25	1,95±0,35	1,51±0,09
Ноздреватая и пурпурная капуста	21,00±1,53	13,87±1,25	15,73±1,73	3,67±0,34	3,40±0,15	1,64±0,08
Японская капуста	16,30±2,17	14,43±0,66	15,76±3,06	0,97±0,03	1,10±0,15	1,03±0,09
Репа	21,25±1,36	23,39±1,04	30,90±2,54	2,00±0,29	1,63±0,15	1,44±0,09
Листовая репа	14,80±1,84	12,68±1,66	11,11±0,95	2,90±0,28	3,81±0,32	1,97±0,14
Сурепица	16,20±0,85	15,63±0,58	14,71±0,80	1,10±0,07	1,16±0,10	0,71±0,05
Сурепица дикая	14,00±3,01	10,50±0,50	15,15±3,16	0,90±0,10	0,75±0,25	0,64±0,13
Среднее по коллекции	16,53±0,64	16,07±0,65	16,33±1,37	1,98±0,14	2,04±0,13	1,29±0,07
НСР ₀₅	1,93	1,95	4,11	0,43	0,41	0,22

Примечание. К — Южный Китай, г. Гуанчжоу (провинция Гуандун), П — Пушкинский филиал Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова — ВИР, г. Санкт-Петербург. Полевые опыты выполняли в Китае в 2010 году, в Пушкине в 1997-2016 годах, эксперименты в условиях теплицы — в 2013-2016 годах. Латинские обозначения культур см. в таблице 1. Результаты получены при анализе 96 образцов из стержневой коллекции ВИР. Приведены средние (\bar{X}) и ошибки средних ($\pm S_x$).

Средняя по популяции длина черешка при всех условиях выращивания была стабильной, ширина черешка в условиях юга Китая и Ленинградской области различались незначительно, но в теплице оказалась суще-

ственно меньше (см. табл. 2). У пурпурной и ноздреватой капусты, японской капусты, листовой репы и дикой сурепицы длина черешка в условиях юга Китая была значительно больше, чем в Ленинградской области, у культурной сурепицы — незначительно больше, у репы и розеточной капусты — меньше. В теплице у китайской капусты, листовой репы и сурепицы черешок был короче, чем в поле, у остальных культур — длиннее (у репы — в 2 раза длиннее среднего по популяции). Все образцы пекинской капусты имели цельные сидящие листья без черешка. Длинный, относительной широкий черешок был характерен для корнеплодной репы, ноздреватой и японской капусты (на 15-30 % длиннее среднего значения по коллекции), короткий — для розеточной капусты. У образцов длина черешка в полевых условиях и в теплице в основном различалась незначительно (на 1-4 см), за исключением японской капусты и корнеплодной репы, у которых черешок в теплице оказался на 10-15 см длиннее, чем в полевых условиях. Самый широкий черешок обнаружили у образцов китайской и ноздреватой капусты и листовой репы, тонкий — у японской капусты и сурепицы. В полевых тестах черешок был достоверно шире у всех культур, за исключением японской капусты и дикой сурепицы.

Поверхность листовой пластинки у образцов коллекции различалась в зависимости от ботанической принадлежности генотипа — от гладкой до складчатой или слабо-, средне- и сильноморщинистой, характер опущения варьировал (от отсутствия до сильной степени проявления), окраска пластинки изменялась от светло- до темно-зеленой.

3. Образцы вида *Brassica rapa* L., выделившиеся по размеру продуктивных органов в контрастных условиях

Образец, номер по каталогу ВИР	Длина пластинки, см			Ширина пластинки, см			Длина черешка, см		
	полевой опыт		П,	полевой опыт		П,	полевой опыт		П,
	К	П	теплица	К	П	теплица	К	П	теплица
	Пекинская капуста (бесчерешковая культура)								
Kiriba Santo, к-210	55,0±2,6	45,9±3,3	36,3±4,2	22,0±1,7	22,6±1,5	14,8±1,2			
Chosen, к-207	50,6±2,8	42,1±2,1	37,9±2,7	25,6±2,4	20,2±1,9	18,1±2,6			
Среднее по культуре	38,2±1,6	41,8±1,0	31,8±0,7	19,3±0,8	25,0±0,8	16,0±0,4			
	Китайская капуста								
Тай-на, к-46	24,2±2,3	22,8±2,7	16±3,1	19,0±2,6	18,2±2,2	13,8±2,8	13±1,8	22,8±3,0	16,7±2,5
Nicanme Jukijiro									
Taisai, к-214	26,5±2,8	23,3±2,5	12,9±2,8	21,5±1,4	18,1±1,8	10,3±1,6	25,4±2,4	19,5±2,7	17,1±2,0
Среднее по культуре	26,1±2,5	21,3±1,1	16,1±1,2	19,2±1,3	16,3±1,1	11,2±0,6	16,0±1,8	15,4±1,7	12,3±1,3
	Листовая репа								
Goseki Late, к-242	40,3±3,7	40,5±2,9	25,9±3,2	21,5±2,8	23,1±2,0	9,5±1,9	16,6±2,3	11,5±2,2	9,6±1,6
Bansei Mana, к-372	50,4±3,2	45,2±3,6	22,6±2,6	36,8±3,4	26,9±2,6	15,4±1,4	9,1±2,1	9,8±2,1	8,4±1,2
Среднее по культуре	27,6±2,1	33,8±2,6	21,8±1,0	18,7±1,2	23,5±1,3	12,4±0,7	14,8±1,8	12,7±1,7	11,1±0,9

Примечание. К — Южный Китай, г. Гуанчжоу (провинция Гуандун), П — Пушкинский филиал Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова — ВИР, г. Санкт-Петербург. Полевые опыты выполняли в Китае в 2010 году, в Пушкине в 1997-2016 годах, эксперименты в условиях теплицы — в 2013-2016 годах. Латинские обозначения культур см. в таблице 1. Результаты получены при анализе 96 образцов из стержневой коллекции ВИР. Приведены средние (\bar{X}) и ошибки средних ($\pm Sx$).

В стержневой коллекции в качестве генетических источников мы выделили образцы, у которых размеры продуктивных органов были достоверно выше среднепопуляционных показателей (табл. 3). При этом у ряда образцов в контрастных условиях испытания длина и ширина листовых пластинок и черешков стабильно превышала средние значения для культуры, что свидетельствует о высокой адаптивной способности. Незначительную изменчивость по этим признакам отмечали у образцов пекинской капусты Kiriba Santo, Chosen, китайской капусты Тай-на, Nicanme Jukijiro Taisai, местной китайской репы (к-163), формирующей товарный корнеплод и листовую розетку высокого салатного качества. Настоящее исследование подтвердило, что для выращивания в теплице более подходят листовые и полукочанные сорта пекинской капусты в отличие от типично

кочанных сортов, о чем сообщалось ранее (6); адаптивные свойства кол-лекционных образцов других культур вида при сравнительных испытаниях в теплице и в полевых условиях нами оценены впервые.

Отсутствие опущения и яркая окраска повышают потребительские качества листовых культур *B. rapa*. У выделившихся образцов опущение отсутствовало или проявлялось очень слабо, а окраска листовой пластинки варьировала от ярко-светло-зеленой до ярко-темно-зеленой.

Биохимические исследования показали (табл. 4), что содержание сухого вещества в среднем по стержневой коллекции вида *B. rapa* в полевых условиях составляло $7,77 \pm 0,25$ % и достоверно превышало аналогичный показатель в теплице — $5,36 \pm 0,15$ %, причем у всех культур, кроме пекинской капусты, превышение было значительным — на 30-140 % (см. табл. 4). Содержание сухого вещества достоверно различалось у разных культур вида и колебалось от 5,65 % у пекинской капусты до 11,24 % у листовой репы в полевых опытах и от 4,44 % у китайской капусты до 6,62 % у репы в теплице. Таким образом, амплитуда изменчивости по содержанию сухого вещества в полевых условиях была значительно больше, чем в теплице.

4. Содержание ($\bar{X} \pm S_x$) питательных и биологически активных веществ у культур вида *Brassica rapa* L. при разных условиях произрастания

Культура	Сухое ве- щество, %	Белок, %	Аскорбино- вая кислота, мг/100 г	Хлорофилл, мг/100 г		Каротино- иды, мг/100 г	β -Каротин, мг/100 г
				a	b		
В полевых условиях (2006-2016 годы)							
Капуста:							
пекинская	5,65 \pm 1,47	23,73 \pm 3,86	50,45 \pm 14,82	26,21 \pm 12,04	11,72 \pm 5,94	10,30 \pm 4,28	1,82 \pm 0,85
китайская	9,99 \pm 1,91	24,85 \pm 2,73	65,21 \pm 13,36	64,51 \pm 11,96	29,03 \pm 9,87	17,60 \pm 3,62	4,12 \pm 0,67
розеточная	9,41 \pm 1,98	27,80 \pm 3,24	58,03 \pm 13,69	98,87 \pm 9,06	55,46 \pm 6,79	18,74 \pm 2,05	6,34 \pm 0,63
ноздреватая и							
пурпурная	8,36 \pm 3,29	29,09 \pm 2,00	46,24 \pm 5,93	74,71 \pm 4,91	37,69 \pm 6,83	16,18 \pm 2,58	4,56 \pm 0,19
японская	9,17 \pm 0,10	23,49 \pm 3,01	46,24 \pm 1,36	86,47 \pm 6,86	40,73 \pm 5,54	21,43 \pm 3,50	5,39 \pm 0,26
Репа:							
корнеплодная,							
листья	8,81 \pm 1,62	24,66 \pm 3,82	71,91 \pm 10,29	78,26 \pm 25,09	43,16 \pm 20,32	15,56 \pm 4,75	4,89 \pm 1,53
листовая	11,24 \pm 3,67	21,35 \pm 1,28	77,52 \pm 10,26	98,61 \pm 4,12	47,15 \pm 3,83	20,71 \pm 10,1	6,24 \pm 0,83
Сурепица	7,45 \pm 1,34	27,95 \pm 3,13	69,74 \pm 21,15	81,83 \pm 11,69	47,29 \pm 14,08	12,99 \pm 4,30	5,05 \pm 0,89
Сурепица дикая	10,64 \pm 0,73	17,99 \pm 1,04	68,68 \pm 4,80	75,25 \pm 0,64	41,09 \pm 1,09	10,77 \pm 1,02	4,55 \pm 0,03
Среднее							
по коллекции	7,77 \pm 0,25	24,87 \pm 0,39	58,70 \pm 1,65	59,06 \pm 3,27	30,63 \pm 2,09	14,06 \pm 0,55	3,77 \pm 0,19
НСР ₀₅	0,77	1,17	4,95	9,83	6,29	1,64	0,56
В теплице (2014 год)							
Капуста:							
пекинская	4,84 \pm 0,08	31,06 \pm 0,48	35,00 \pm 1,44	48,15 \pm 2,54	18,23 \pm 1,32	23,07 \pm 0,76	2,97 \pm 0,16
китайская	4,44 \pm 0,13	24,12 \pm 0,98	30,00 \pm 4,21	73,30 \pm 4,49	36,03 \pm 2,88	27,85 \pm 3,78	4,46 \pm 0,30
розеточная	4,72 \pm 0,28	23,65 \pm 0,90	19,00 \pm 3,01	63,22 \pm 0,78	33,34 \pm 0,33	20,46 \pm 0,56	4,09 \pm 0,01
ноздреватая и							
пурпурная	5,40 \pm 0,18	20,46 \pm 0,58	19,00 \pm 1,15	64,11 \pm 5,09	36,77 \pm 3,63	16,93 \pm 3,38	3,78 \pm 0,31
японская	5,44 \pm 0,12	27,23 \pm 1,51	38,00 \pm 5,20	87,60 \pm 6,67	37,41 \pm 3,47	36,39 \pm 2,42	5,45 \pm 0,38
Репа:							
корнеплодная,							
листья	6,62 \pm 0,17	25,32 \pm 0,67	15,00 \pm 0,63	77,26 \pm 4,03	50,29 \pm 3,46	14,65 \pm 1,08	4,70 \pm 0,26
листовая	4,46 \pm 0,23	27,36 \pm 0,98	37,00 \pm 4,54	57,62 \pm 5,23	27,85 \pm 6,78	25,19 \pm 2,81	3,56 \pm 0,30
Сурепица	6,08 \pm 0,14	27,69 \pm 0,55	20,00 \pm 0,53	65,70 \pm 1,45	46,11 \pm 2,37	11,79 \pm 0,56	4,02 \pm 0,07
Сурепица дикая	5,80 \pm 0,28	25,32 \pm 2,98	21,00 \pm 0,71	78,24 \pm 9,88	56,08 \pm 12,01	15,28 \pm 4,28	4,73 \pm 0,49
Среднее							
по коллекции	5,36 \pm 0,10	27,50 \pm 0,40	27,03 \pm 1,16	63,24 \pm 1,71	35,15 \pm 1,72	19,77 \pm 0,94	3,88 \pm 0,10
НСР ₀₅	0,29	1,2	3,47	5,12	5,16	2,81	0,31

Примечание. Содержание белка указано в расчете на сухую, биологически активных веществ — на сырую массу. Испытания проводились в Пушкинском филиале Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР, г. Санкт-Петербург). Латинские обозначения культур см. в таблице 1. Результаты получены при анализе 96 образцов из стержневой коллекции ВИР.

По белку мы не выявили подобных закономерностей: в полевых опытах его содержание было значительно ниже среднего по коллекции у дикой сурепицы и значительно выше — у ноздреватой и пурпурной капусты (см. табл. 4), а в теплице у ноздреватой капусты, наоборот, отмечали

наименьший показатель при наибольшем у пекинской капусты. В среднем по коллекции содержание белка повышалось в теплице, однако размах изменчивости признака (11 %) сохранялся независимо от условий произрастания. У китайской капусты, репы и сурепицы содержание белка при сравнительных испытаниях было практически стабильным, у пекинской и японской капусты, листовой репы и сурепицы — оказалось выше в теплице, у розеточной, ноздреватой и пурпурной капусты — в полевых условиях. В отношении последней группы растений причина, возможно, связана с их относительно медленным ростом или с характерным проявлением анализируемого признака, общим для указанных ботанически близких культур.

Культуры вида *B. rapa* — важные источники аскорбиновой кислоты, каротиноидов, хлорофиллов. В наших исследованиях содержание аскорбиновой кислоты у образцов *B. rapa* варьировало достаточно широко: минимальные значения соответствовали средним для белокочанной капусты, максимальные превосходили их в несколько раз. В среднем по коллекции показатели были в 2 раза выше в полевых условиях ($58,7 \pm 1,65$ против $27,03 \pm 1,16$ мг/100 г), и эту закономерность отмечали для всех культур, за исключением японской капусты, у которой разница оказалась не такой значительной. Напротив, содержание аскорбиновой кислоты у розеточной и ноздреватой капусты, корнеплодной репы и сурепицы при выращивании в поле было выше в 3 раза и больше, чем в теплице. Наибольшее накопление аскорбиновой кислоты в поле наблюдали у китайской капусты, репы и сурепицы, в теплице — у пекинской и японской капусты и листовой репы.

В среднем по коллекции каротиноиды достоверно активнее накапливались в условиях теплицы ($19,77 \pm 0,94$ против и $14,06 \pm 0,55$ мг/100 г, $НСР_{05}$ соответственно 2,81 и 1,64). Это особенно важно в зимний и весенний периоды, когда пища бедна витаминами. Самым богатым источником каротиноидов были тепличные растения японской капусты, затем следовала китайская капуста, дикая сурепица и листовая репа. В полевых условиях по этому признаку выделялись образцы японской, китайской, розеточной капусты и листовой репы. У пекинской капусты и дикой сурепицы превышение количества каротиноидов в теплице было более чем 2-кратным относительно регистрируемого в поле. У розеточной, ноздреватой и пурпурной капусты, сурепицы и репы количество каротиноидов оказалось относительно стабильным. Примерно 20 % фракции каротиноидов составляют каротины. Собственно каротин на 80-90 % представлен β -формой. В среднем содержание β -каротина мало различалось (в теплице и в поле — соответственно $3,88 \pm 0,1$ и $3,77 \pm 0,19$ мг/100 г). Его накопление было стабильным у китайской и японской капусты, репы, дикой сурепицы, у пекинской капусты оно было достоверно выше в теплице ($2,97 \pm 0,16$ против и $1,82 \pm 0,85$ мг/100 г, $НСР_{05}$ соответственно 0,56 и 0,31), у розеточной, ноздреватой и пурпурной капусты, листовой репы — в поле, а максимальным накоплением характеризовалась японская, китайская и розеточная капуста.

Хлорофилл играет значительную роль в диетическом питании: употребление в пищу зеленых листьев повышает количество гемоглобина и эритроцитов в крови. В среднем по коллекции содержание хлорофиллов а и b было несущественно выше в теплице (сумма $63,24 \pm 1,71$ и $35,15 \pm 1,72$ против суммы $59,06 \pm 3,27$ и $30,63 \pm 2,09$ мг/100 г). Практически стабильное содержание хлорофиллов (особенно хлорофилла а) при обоих способах выращивания отмечали у японской капусты, репы и дикой сурепицы, повышение показателя в теплице — у пекинской и китайской капусты, в поле — у розеточной и ноздреватой капусты, листовой репы и сурепицы. При недостатке свежих салатных овощей в зимне-весенний период в теплицах

выращивают главным образом быстро растущие культуры (пекинскую и китайскую капусту), ценность которых, таким образом, повышается благодаря способности накапливать зеленые пигменты в этих условиях. В качестве тепличных культур можно также рекомендовать розеточную, ноздреватую, японскую капусту и листовую репу, значительно превосходящие пекинскую капусту по содержанию хлорофиллов (их максимальное количество отмечали у розеточной и японской капусты и листовой репы).

Проведенный корреляционный анализ биохимических признаков показал, что количество сухого вещества достоверно и однонаправленно связано с содержанием хлорофиллов, каротинов и β -каротина, независимо от условий культивирования (табл. 5). Взаимозависимость между содержанием сухого вещества и аскорбиновой кислоты, а также каротиноидов была существенной, но разнонаправленной (прямая — в полевых условиях, обратная — в теплице). В полевых условиях выявили значимую обратную связь между содержанием сухого вещества и белка, в условиях теплицы — между содержанием аскорбиновой кислоты и хлорофилла *b* (обратная зависимость), каротиноидов, белка (прямая зависимость). Высокодостоверной была взаимозависимость между количеством хлорофиллов *a* и *b*, а также их связь с накоплением каротиноидов и каротинов (особенно β -каротина). Существенную корреляцию отмечали между содержанием каротинов и β -каротина. Таким образом, образцы, сочетающие высокое содержание хлорофиллов и каротинов, можно получить достаточно легко, тогда как селекция на одновременно высокое содержание белка и аскорбиновой кислоты будет вызывать затруднения.

5. Коэффициенты корреляции между биохимическими признаками качества у культур вида *Brassica rapa* L. при разных условиях произрастания

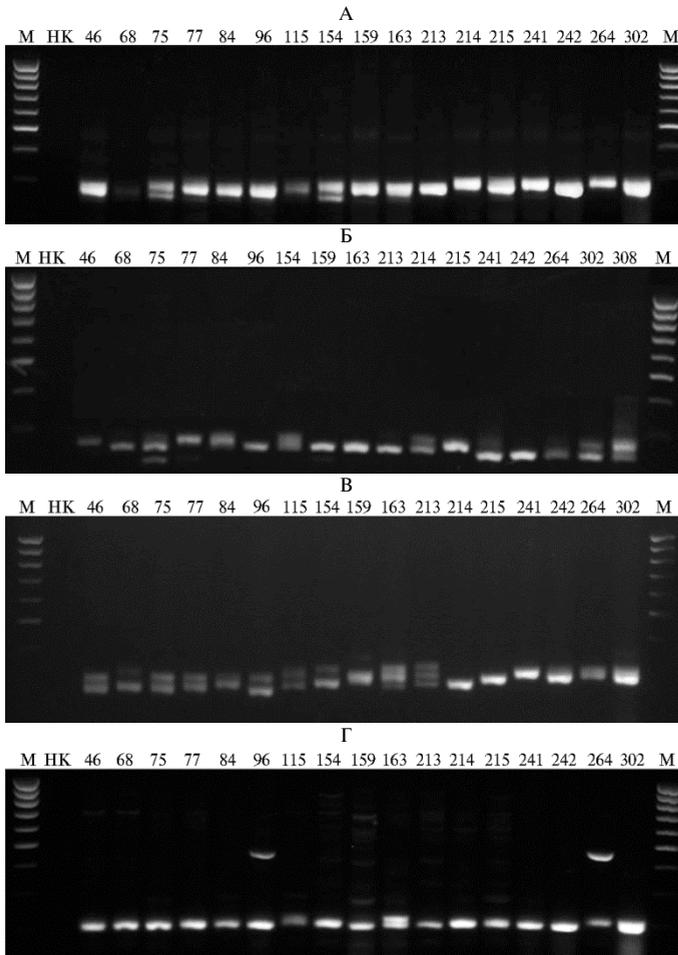
Показатель	СВ	АК	Ха	Хb	Кд	Ка	β -К	Б
В полевых условиях (2006–2016 годы)								
Сухое вещество (СВ)		0,51*	0,59*	0,36	0,55*	0,67*	0,59*	-0,49*
Аскорбиновая кислота (АК)			0,29	0,26	-0,02	0,33	0,30	-0,39
Хлорофилл <i>a</i> (Ха)				0,93**	0,59*	0,49*	0,99**	0,16
Хлорофилл <i>b</i> (Хb)					0,32	0,37	0,92**	0,28
Каротиноиды (Кд)						0,49*	0,63*	0,09
Каротины (Ка)							0,49*	0,01
β -Каротин (β -К)								0,16
Белок (Б)								
В теплице (2014 год)								
Сухое вещество (СВ)		-0,59*	0,31	0,58*	-0,53*	0,71**	0,36	-0,02
Аскорбиновая кислота (АК)			-0,11	-0,59*	0,83**	-0,42	-0,09	0,58*
Хлорофилл <i>a</i> (Ха)				0,74**	0,21	0,67*	0,95**	-0,31
Хлорофилл <i>b</i> (Хb)					-0,48*	0,87**	0,64*	-0,37
Каротиноиды (Кд)						-0,36	0,29	0,22
Каротины (Ка)							0,63*	-0,18
β -Каротин (β -К)								-0,25
Белок (Б)								

Примечание. Испытания образцов из стержневой коллекции ВИР проводились в Пушкинском филиале Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР, г. Санкт-Петербург). *, ** Значимые ($p < 0,05$) и высокозначимые ($p < 0,001$) коэффициенты корреляции.

На основании полученных данных мы определили новые генетические источники изучаемых биохимических признаков при выращивании в полевых условиях и в теплице с содержанием сухого вещества соответственно 5,44–7,03 и 4,20–5,40 % (выше среднего значения для культуры), белка — 12,61–24,66 и 24,12–33,23 %, аскорбиновой кислоты — 32,56–46,46 и 30,00–61,47 мг/100 г, хлорофилла *a* — 33,35–110,64 и 53,82–95,99 мг/100 г, хлорофилла *b* — 12,20–53,80 и 17,89–44,78 мг/100 г, β -каротина — 1,80–6,75 и 3,00–6,04 мг/100 г. Это образцы полукочанной пекинской капусты Сюа-байкоу и Дунганская, китайской капусты Майская и Ching Pang Yu Tsai, вы-

делившийся особенно высоким содержанием хлорофиллов и каротина.

Для молекулярно-генетических исследований отобрали 8 SSR (simple sequence repeats) маркеров, пригодных для последующего скрининга образцов мировой коллекции. Маркеры располагались в A03 (3 маркера), A05 (1 маркер), A06 (2 маркера) и A09 (2 маркера) хромосомах, охватывая группы сцепления, на которых, по данным выполненного нами QTL-анализа (10-12, 18), размещаются локусы, контролирующие морфологические и биохимические призна-



Результаты ПЦР-анализа образцов вида *Brassica rapa* L. SSR (simple sequence repeats) маркерами BRMS051 (А), KS51082 (Б), BRMS043 (В) и KS50200 (Г): 46, 68, 75, 77, 84, 96, 115, 154, 159, 163, 213, 214, 215, 241, 242, 264, 302 и 308 — образцы (номера по каталогу ВИР), НК — отрицательный контроль, М — маркер молекулярной массы М16-ДНК-маркер 100 бп (10 фрагментов от 100 до 1000 п.н., «Сибэнзим», Россия). Коллекция Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова.

ками качества вида. Неравномерность распределения маркеров по хромосомам косвенно свидетельствует о присутствии на них установленных нами геномных блоков коадаптированных генов, а в целом по геному — на существование коадаптированных блоков генов. Наличие таких блоков в геноме *B. rapa* подтверждается нашими проведенными ранее исследованиями, в результате которых были установлены генетические детерминанты устойчивости *B. rapa* к разным расам *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, вызывающим у растений этого вида сосудистый бактериоз (18-20). Следует отметить эффективность отобранных нами молекулярных маркеров, поскольку некоторые маркеры (например, BRMS043 и BRMS034) оказались эффективными молекулярно-генетическими дескрипторами вида по устойчивости к сосудистому бактериозу, которые мы применили для выявления коллекционных образцов *B. rapa*, устойчивых к каждой расе *X. campestris* отдельно и к патогену в целом (18, 21, 22).

При оценке 8 молекулярными маркерами в выборке из 18 образцов *B. rapa* мы выявили 26 полиморфных SSR-фрагментов размером от 122 до 410 п.н. Маркер BRMS051 (рис., А) при ожидаемом размере ампликона 262 п.н. у 77 % образцов был сцеплен с признаком длины и ширины листовой пластинки, причем у 58 % ее ширина составляла 20 см и более. В 60 % случаев аллели, представленные фрагментами 262 п.н. и 280 п.н., ока-

зались ассоциированы. Фрагмент (аллель) 280 п.н. проявлялся у всех линий со средней длиной листовой пластинки (до 20 см), у всех образцов розеточной капусты, у всех образцов и сортоформ китайской капусты и у 60 % стабильных гибридов, родительской формой которых выступала китайская капуста. Отметим, что эти сортоформы китайской капусты имели зеленую (но не светло- или темно-зеленую) окраску листовой пластинки. Фрагмент (аллель) 262 п.н. обнаружили у 75 % образцов листовой репы.

Маркер KS51082 (см. рис., Б) был сцеплен с QTL длины черешка. Образцы к-115, к-163 и к-214 с ожидаемым фрагментом 282 п.н. имели длинный и очень длинный черешок (22-40 см). Ампликон 282 п.н. выявили у всех образцов японской капусты и у 50 % образцов листовой репы.

С помощью маркера BRMS043 (см. рис., В) обнаружили образцы с ожидаемым размером ампликона 318 п.н., у которых в 70 % случаев поверхность листовой пластинки была гладкой и слабоморщинистой. Все образцы с парой фрагментов (аллелей) 285 и 305 п.н. имели гладкие или слабоморщинистые листья. Образцы к-115, к-154, к-163 и к-213, сочетающие фрагменты 285 и 318 п.н., выделялись по содержанию β -каротина (5,1-6,2 мг/100 г). При наличии ампликона 318 п.н. 71 % вариантов имели достаточно длинную или длинную листовую пластинку (26-44 см), но средней ширины (16-23 см), а у 75 % образцов с короткими листовыми пластинками (11-23 см) проявлялся фрагмент (аллель) 305 п.н. У всех образцов китайской капусты и гибрида китайской и пекинской капусты нашли аллель 285 п.н., у японской капусты в 60 % случаев проявился фрагмент 318 п.н. У половины образцов листовой репы обнаружили тот же аллель (318 п.н.), у 75 % — аллель, соответствующий фрагменту 305 п.н.

Использование молекулярного маркера O112-F02, сцепленного с QTL опушения и окраски листовой пластинки (7), выявило четыре фрагмента — 200, 185, 175 и 140 п.н. Молекулярный анализ тех же образцов маркером BRMS014 при наличии одновременно двух ампликонов 263 и 280 п.н. установил его сцепленность с QTL окраски (от светло-зеленой до зеленой) для большей части образцов (80 %) из тех, у которых эти ампликоны проявились. Ту же пару ампликонов обнаружили у 70 % образцов китайской капусты и ее гибридов.

Скрининг маркером KS50200 (см. рис., Г) выявил фрагменты 292, 280 и 260 п.н. Образцы, проявившие ампликон 260 п.н., в 75 % случаев имели темно-зеленую листовую пластинку шириной 15-20 см с гладким, иногда слабоволнистым краем. Ампликон 280 п.н. обнаружили у гибридов китайской и пекинской капусты, а также у 75 % листовых реп (у последних ширина пластинки — в среднем 20 см, окраска темно-зеленая, край от гладкого до слабоволнистого). У китайской капусты (75 % образцов со светло-зеленой и зеленой окраской и гладким краем листовой пластинки при ее ширине 15-21 см) проявился фрагмент, соответствующий аллелю 292 п.н. Фрагмент этого размера обнаружили у 66 % образцов японской репы с острозубчатой надрезанностью края листа.

Скрининг молекулярным маркером BRMS034, сцепленным, как сообщалось ранее при анализе картирующих популяций линий удвоенных гаплоидов (12), с признаком окраски листовой пластинки, показал наличие ампликонов 122 и 144 п.н. (у форм с ампликоном 144 п.н. она темно-зеленая), однако у изученных образцов не проявилась достоверная взаимосвязь между выявленными ампликонами и признаком.

При скрининге BRMS042 оказалось, что ампликон с ожидаемым размером 380 п.н. имелся у всех изученных образцов. У двух из трех образцов ноздреватой капусты обнаружили ампликон 410 п.н., который также выявили у одного образца китайской капусты (к-46). У японской капу-

сты и листовой репы присутствовали ампликоны размером 620-170 п.н., нехарактерные для остальных образцов изученной стержневой коллекции.

Таким образом, мы провели комплексную (морфологическую, биохимическую, молекулярно-генетическую) оценку признаков качества у форм *Brassica rapa* в эколого-географических испытаниях при разных способах выращивания. Отметим, что анализ геномов *B. rapa* молекулярно-генетическими маркерами, находящимися в неравновесном сцеплении с QTL таких признаков, как характер окраски листовой пластинки, содержание общего белка, β -каротина, каротиноидов, аскорбиновой кислоты, сухого вещества, никогда ранее никем не выполнялся. Эти исследования подтвердили возможность использовать найденные нами SSR-маркеры морфологических и биохимических признаков для скрининга коллекционного и селекционного материала. Кроме того, полученные оригинальные результаты позволяют перейти к практическому осуществлению ассоциативного картирования и идентификации конкретных генетических детерминант, определяющих проявление ряда хозяйственно ценных и экономически значимых признаков качества, на основе использования уникального материала *B. rapa* из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР).

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьева А.Е., Артемьева А.М. Биохимические исследования восточноазиатских листовых овощных растений рода *Brassica* L. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 1999, 157: 142-148.
2. Соловьева А.Е., Артемьева А.М. Капустные растения рода *Brassica* L. (Характеристика образцов по основным биохимическим показателям качества). В кн.: Каталог мировой коллекции ВИР. СПб, 2004. Вып. 756.
3. Соловьева А.Е., Артемьева А.М. Биологически активные вещества капустных растений рода *Brassica* L. Аграрная Россия, 2006, 6: 52-56.
4. Соловьева А.Е., Артемьева А.М. Качественная оценка некоторых восточноазиатских культурных типов вида *Brassica rapa* L. Аграрная Россия, 2006, 6: 56-60.
5. Соловьева А.Е., Артемьева А.М. Особенности биохимического состава гибридов листовых овощных культур вида *Brassica rapa* L. Аграрная Россия, 2010, 3: 17-20.
6. Артемьева А.М. Экологическая дифференциация капусты пекинской *Brassica rapa* ssp. *pekinensis* (Lour.) Olsson. В кн.: Генетические коллекции овощных растений. СПб, 2001. Т. 3: 148-166.
7. Артемьева А.М. Доноры и источники для селекции листовых овощных культур вида *Brassica rapa* L. В кн.: Каталог мировой коллекции ВИР. СПб, 2004. Вып. 740.
8. Lin K., Zhang N., Severing E.I., Nijveen H., Cheng F., Visser R.G.F., Wang X., de Ridder D., Bonnema G. Beyond genomic variation — comparison and functional annotation of three *Brassica rapa* genomes: a turnip, a rapid cycling and a Chinese cabbage. *BMG Genomics*, 2014, 15: 250 (doi: 10.1186/1471-2164-15-250).
9. Артемьева А.М., Соловьева А.Е., Чесноков Ю.В. Оценка морфологических и биохимических признаков качества у линий удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L. Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук, 2014, 3: 38-41.
10. Артемьева А.М., Соловьева А.Е., Кочерина Н.В., Чесноков Ю.В. QTL анализ биохимических признаков качества у *Brassica rapa* L. Овощи России, 2014, 1: 10-13.
11. Артемьева А.М., Руднева Е.Н., Кочерина Н.В., Чесноков Ю.В. QTL анализ морфологических признаков качества у *Brassica rapa* L. Овощи России, 2014, 2: 14-17.
12. Артемьева А.М., Соловьева А.Е., Кочерина Н.В., Беренсен Ф.А., Руднева Е.Н., Чесноков Ю.В. Картирование хромосомных локусов, определяющих проявление морфологических и биохимических признаков качества у культур вида *Brassica rapa* L. Физиология растений, 2016, 63(2): 275-289 (doi: 10.7868/S0015330316020044).
13. Specht C.E., Diederichsen A. *Brassica*. Mansfeld's Encyclopedia of agricultural and horticultural crops /P. Hanelt (ed.). Springer-Verlag, Berlin, 2001. V. 3: 1435-1465.
14. Боос Г.В., Джохадзе Т.И., Артемьева А.М., Кривченко В.И., Симон А.М., Тимошенко З.В., Петровская Н.Н., Власова Э.А., Синельникова В.Н., Барашкова Э.А., Ивакин А.П., Ермаков А.И., Воскресенская В.В. Методические указания по изучению и поддержанию мировой коллекции капусты. Л., 1988.
15. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Иконникова М.И., Ярош Н.П., Луковникова Г.А. Методы биохимического исследования растений. Л., 1972.
16. Дорохов Д.Б., Клоке Э. Быстрая и экономичная технология RAPD анализа расти-

- тельных геномов. Генетика, 1997, 33: 358-365.
17. Артемьева А.М., Чесноков Ю.В., Клоке Э. Генетическое разнообразие и внутривидовые филогенетические взаимоотношения культур вида *Brassica rapa* L. по результатам анализа микросателлитов. Информационный вестник ВОГиС, 2008, 12(4): 608-619.
 18. Артемьева А.М., Соловьева А.Е., Кочерина Н.В., Руднева Е.Н., Волкова А.И., Чесноков Ю.В. ДНК маркированные линии двойных гаплоидов *Brassica rapa* L. и идентифицированные QTL, контролирующие хозяйственно ценные признаки для использования в селекции листовых капустных культур. В кн.: Каталог мировой коллекции ВИР. СПб, 2012. Вып. 810.
 19. Артемьева А.М., Волкова А.И., Кочерина Н.В., Чесноков Ю.В. Молекулярно-генетическое картирование хромосомных локусов, определяющих устойчивость линий двойных гаплоидов *Brassica rapa* L. к сосудистому бактериозу. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, 2012, 27: 73-77.
 20. Волкова А.И., Артемьева А.М., Чесноков Ю.В. Фитопатологическая оценка линий двойных гаплоидов вида *Brassica rapa* L. Мат. конф. молодых ученых и аспирантов «Актуальность наследия Н.И. Вавилова для развития биологических и сельскохозяйственных наук». СПб, 2012: 160-166.
 21. Волкова А.И., Артемьева А.М., Кочерина Н.В., Чесноков Ю.В. Идентификация молекулярных маркеров хромосомных локусов, детерминирующих устойчивость *Brassica rapa* L. к сосудистому бактериозу. Доклады ТСХА, 2013, 285(1): 219-222.
 22. Artemyeva A.M., Rudneva E.N., Volkova A.I., Kocherina N.V., Chesnokov Yu.V. Detection of chromosome loci determined morphological and black rot resistance traits in *Brassica rapa* L. Acta Horticulturae, 2013, 1005: 105-110 (doi: 10.17660/ActaHortic.2013.1005.8).

¹ФГБНУ ФИЦ Всероссийский институт
генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова,

190000 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44;

²ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,

195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,

e-mail: yuv_chesnokov@agrophys.ru

Поступила в редакцию

20 июня 2016 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2017, V. 52, № 1, pp. 129-142

ECOLOGICAL AND GENETIC EVALUATION OF MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHARACTERS OF QUALITY IN *Brassica rapa* L. ACCESSIONS FROM VIR COLLECTION

A.M. Artemyeva¹, A.E. Solov'eva¹, F.A. Berensen¹, N.V. Kocherina¹, Yu.V. Chesnokov²

¹Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Federal Agency of Scientific Organizations, 42-44, ul. Bol'shaya Morskaya, St. Petersburg, 190000 Russia;

²Agrophysical Research Institute, Federal Agency of Scientific Organizations, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail yuv_chesnokov@agrophys.ru

ORCID:

Artemyeva A.M. orcid.org/0000-0002-6551-5203

Solov'eva A.E. orcid.org/0000-0002-6201-4294

Berensen F.A. orcid.org/0000-0002-0492-2024

The authors declare no conflict of interests

Supported in part by Russian Foundation for Basic Research (grant № 13-04-00128-a)

Received June 20, 2016

Kocherina N.V. orcid.org/0000-0002-8791-1899

Chesnokov Yu.V. orcid.org/0000-0002-1134-0292

doi: 10.15389/agrobiol.2017.1.129eng

Abstract

Peculiarity of chemical composition of *Brassica rapa* L. crops (high water content and low content of fats) determine their low-calorie character. They are notable for relatively high content of carbohydrates and proteins, including all essential amino acids. Biochemical composition varies greatly among *B. rapa* members. We are the first to carry out a multifactor evaluation of valuable morphological and biochemical traits of *B. rapa* accessions from the core collection of Vavilov Institute of Plant Genetic Resources (VIR, 96 samples) in eco-geographical study (South China and Leningrad region of Russia) under field trials and under a greenhouse conditions. By means of the developed SSR (simple sequence repeats) markers which are in linked disequilibrium with QTL of morphological and biochemical traits, the molecular genetic analysis was firstly carried out in leafy, rooted, and oilseed *B. rapa* genotypes from the VIR core collection. As a result, new genetic sources for quality parameters have been found among the samples investigated. In average, the samples did not differ noticeably on plant morphology (leaf length, leaf width, petiole size, hairiness, colour) in field tests when growing in South China and in Leningrad region, whereas in a greenhouse at higher plant density the leaf size decreased, e.g. in Chinese cabbage, pak-choi, wutacai, and turnip the leaves were 5-12 cm longer and wider in the field tests. Under field trials, we revealed the significant and high significant correlations between dry matter (DM) and ascorbic acid (AA) level ($r = 0.51$, $p < 0.05$), DM and chlorophyll a (Chla) content ($r = 0.59$, $p < 0.05$), DM and carotenoids

(Cd) ($r = 0.55$, $p < 0.05$), DM and carotins (Cn) ($r = 0.67$, $p < 0.05$), DM and β -carotene (β -C) ($r = 0.59$, $p < 0.05$), DM and protein (P) level ($r = -0.49$, $p < 0.05$); Chla and Chlb ($r = 0.93$, $p < 0.001$), Chla and Cd ($r = 0.59$, $p < 0.05$), Chla and Cn ($r = 0.49$, $p < 0.05$), Chla and β -C ($r = 0.99$, $p < 0.001$); Chlb and β -C ($r = 0.92$, $p < 0.001$); Cd and Cn ($r = 0.49$, $p < 0.05$), Cd and β -C ($r = 0.63$, $p < 0.05$); Cn and β -C ($r = 0.49$, $p < 0.05$). In the greenhouse, the significant and high significant r values were as follows: $r = -0.59$ ($p < 0.05$) for DM and AA, $r = 0.58$ ($p < 0.05$) for DM and Chlb, $r = -0.53$ ($p < 0.05$) for DM and Cd, $r = 0.71$ ($p < 0.001$) for DM and Cn; $r = -0.59$ ($p < 0.05$) for AA and Chlb, $r = 0.83$ ($p < 0.001$) for AA and Cd, $r = 0.58$ ($p < 0.05$) for AA and P; $r = 0.74$ ($p < 0.001$) for Chla and Chlb, $r = 0.67$ ($p < 0.05$) for Chla and Cn, $r = 0.95$ ($p < 0.001$) Chla and β -C; $r = -0.48$ ($p < 0.05$) for Chlb and Cd, $r = 0.87$ ($p < 0.001$) for Chlb and Cn, $r = 0.64$ ($p < 0.05$) for Chlb and β -C; $r = 0.63$ ($p < 0.05$) for Cn and β -C. The semi-headed Chinese cabbage Syaobaikou and Dunganskaya, pak-choi Mayskaya, and especially Ching Pang Yu Tsain with a distinctly high level of chlorophylls and carotene, are indicated as new promising genetic sources for valuable biochemical parameters under both field and greenhouse conditions. Their indices in the field trials and greenhouse tests were 5.44-7.03 and 4.20-5.40 %, respectively, for DM (that is higher as compared to mean value for the crop), 12.61-24.66 and 24.12-33.23 % for P, 32.56-46.46 and 30.00-61.47 mg/100 g for AA, 33.35-110.64 and 53.82-95.99 mg/100 g for Chla, 12.20-53.80 and 17.89-44.78 mg/100 g for Chlb, and 1.80-6.75 and 3.00-6.04 mg/100 g for β -C. It is confirmed that the SSR markers BRMS051, KS51082, BRMS043 and KS50200 may effectively screen collection accessions and breeding material for desired morphological and biochemical traits. Our original data allow to practically implement an association mapping strategy and identify genetic determinants of morphological and biochemical quality characteristics using unique *B. rapa* collection preserved in VIR.

Keywords: *Brassica rapa*, morphological and biochemical quality characteristics, molecular markers, screening of plant collection.

Научные собрания

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ЗЕРНОБОБОВЫХ В СЕЛЕКЦИИ»

(Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова — ВИР,
г. Санкт-Петербург, 1-3 ноября 2016 года)

На 68-м заседании Генеральной Ассамблеи ООН 2016 год был провозглашен Международным годом зернобобовых (МГЗ) под патронатом ФАО. Тема конференции, прошедшей в рамках МГЗ в ВИР, продиктована тем, что здесь хранится самая большая в Европе коллекция генетических ресурсов зернобобовых, которая в течение века служит источником материала для селекции. ВИР сыграл неоспоримую роль в поиске нового исходного материала и расширении ассортимента зернобобовых культур в РФ. Благодаря коллекции ВИР в РФ интродуцированы вигна, ряд видов люпина, вики, чины, в результате интрогрессивной селекции появились сорта чечевицы на основе межвидовых скрещиваний. В настоящее время в Государственный реестр селекционных достижений РФ внесено 525 сортов в 22 культуре зернобобовых продовольственного, кормового, сидерационного и декоративного использования.

В конференции участвовали ученые из Российской Федерации, Республики Беларусь, Украины, Республики Казахстан и Сербии. В 24 докладах и 6 постерных сообщениях была дана оценка роли генетических ресурсов зернобобовых и раскрыт потенциал их использования в селекции продовольственных и кормовых сортов. Несколько докладов отражали средообразующую роль зернобобовых, их симбиотические и фиторемедиационные свойства. Была отмечена своевременность инициативы ООН и ФАО по привлечению внимания к зернобобовым культурам как самому важному источнику растительного белка (со сбором с единицы площади, как минимум, в 2 раза больше, чем у зерновых) и их ведущей роли в обогащении рациона питания, биологизации и экологизации растениеводства, создании кормовой базы, улучшении качества жизни. В структуре производства зерна в РФ зернобобовые составляют всего 2,1 %, хотя, по мнению специалистов, могут занимать не менее 10 % зернового клина с площадью более 100 млн га. В странах, представленных на конференции, селекция охватывает все зернобобовые культуры, развивается поступательно и создает конкурентоспособные сорта. В РФ по ряду культур большую часть (до 100 %) производственных площадей занимают отечественные сорта, однако доля зарубежных значительна среди овощных зернобобовых. Поэтому особое внимание следует уделить созданию овощных сортов гороха, фасоли, бобов, а также развитию современных биотехнологий (в частности маркер-опосредованной селекции — MAS) на основе тесного сотрудничества селекционных центров с институтами РАН, ВУЗами, ВИРОм. Участники конференции признали большую роль коллекции в фундаментальных исследованиях, изучении генетического биоразнообразия, что особенно важно в век интегративной биологии. Отмечена актуальность расширения арсенала современных методов, в том числе для выявления не изучавшихся ранее свойств зернобобовых, важных для функционального питания, диетологии, фармацевтики, косметологии, кормопроизводства, использования в аквакультуре и т.д.

М.А. Вишнякова

Контакты и информация: <http://www.vir.nw.ru/lections.htm>