

ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ СТЕБЛЯ ОЗИМОГО И ЯРОВОГО РАПСА (*Brassica napus* L.) НА СЕЛЕКЦИОННО-ЦЕННЫЕ ПРИЗНАКИ

А. Н. ПАВЛОВСКАЯ, Я. Э. ПИЛЮК

РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию»,
г. Жодино, Республика Беларусь, 222161

А. И. МЫХЛЫК

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 30.06.2022)

В статье представлены результаты исследований по комплексу селекционно-ценных признаков для создания сортов и гибридов озимого и ярового рапса с повышенной устойчивостью к полеганию. Установлено, что реализация этих признаков зависит от сортовых особенностей макроструктуры растений и микроструктуры стеблей озимой и яровой форм рапса. Положительная корреляционная связь (r) в сильной степени выявлена у ярового рапса между высотой растения и высотой ветвления ($r=0,88$) и показателем количества стручков на центральной кисти ($r=0,78$). Корреляционный анализ подтвердил положительную связь средней степени между продуктивностью и длиной центральной кисти (озимый – $r=0,57$, яровой – $r=0,54$), а также количеством стручков на ней (яровой – $r=0,56$) и сильной степени ($r=0,77$) для озимого рапса. Выявлено, что более продуктивные сорта и образцы этой культуры имеют более толстый стебель с большим числом проводящих пучков. Показана положительная корреляционная связь средней силы между продуктивностью растений и удалением проводящих пучков от поверхности стебля у генотипов озимого рапса ($r=0,36$) и отрицательная связь у образцов ярового рапса ($r=-0,29$). Выявлена связь сильной степени между продуктивностью семян с растения и диаметром стебля ярового рапса ($r=0,76$). Число проводящих пучков увеличивалось с утолщением склеренхимной ткани ($r=0,13$ – озимый; $r=0,78$ – яровой), а при увеличении тангентального диаметра проводящего пучка возрастала площадь сосудов метаксилемы ($r=0,59$ – озимый; $r=0,77$ – яровой). Отмечено, что увеличение диаметра проводящих пучков и их сосудов целесообразно лишь в условиях достаточного увлажнения почвы. Выявленные особенности строения растений могут быть использованы в селекции озимого и ярового рапса и других культур рода *Brassica*.

Ключевые слова: анатомическое строение стебля, озимый и яровой рапс, устойчивость к полеганию, продуктивность, макро- и микроструктура стебля, число проводящих пучков, склеренхимная ткань, анализ корреляционных связей.

The article presents results of research on a complex of breeding-valuable traits for creating varieties and hybrids of winter and spring rapeseed with increased resistance to lodging. It has been established that the implementation of these traits depends on the varietal characteristics of the macrostructure of plants and the microstructure of the stems of winter and spring forms of rapeseed. A positive correlation (r) was found to a large extent in spring rapeseed between plant height and branching height ($r=0.88$) and the indicator of the number of pods on the central cluster ($r=0.78$). Correlation analysis confirmed a moderate degree of positive relationship between productivity and the length of the central cluster (winter – $r=0.57$, spring – $r=0.54$), as well as the number of pods on it (spring – $r=0.56$) and a strong degree ($r=0.77$) for winter rapeseed. It was revealed that more productive varieties and samples of this crop have a thicker stem with a large number of vascular bundles. A positive correlation of medium strength was shown between plant productivity and the distance of vascular bundles from the stem surface in winter rapeseed genotypes ($r=0.36$) and a negative correlation in spring rapeseed samples ($r=-0.29$). A strong relationship was found between the productivity of seeds from a plant and the stem diameter of spring rapeseed ($r=0.76$). The number of vascular bundles increased with thickening of the sclerenchyma tissue ($r=0.13$ – winter; $r=0.78$ – spring), and with an increase in the tangential diameter of the vascular bundle, the area of metaxylem vessels increased ($r=0.59$ – winter; $r=0.77$ – spring). It is noted that an increase in the diameter of vascular bundles and their vessels is expedient only under conditions of sufficient soil moisture. The revealed features of the plant structure can be used in the selection of winter and spring rapeseed and other crops of the genus *Brassica*.

Key words: anatomical structure of the stem, winter and spring rapeseed, resistance to lodging, productivity, macro- and microstructure of the stem, number of vascular bundles, sclerenchymal tissue, analysis of correlations.

Введение

Изучение развития и взаимосвязи анатомической структуры с макроструктурой и продуктивностью растений является перспективным направлением в селекции сельскохозяйственных культур, в том числе и рапса. Применение современных, научно обоснованных методов работы и использование генетически разнообразного исходного материала позволит усовершенствовать селекционный отбор по интересующим селекционно-ценным признакам.

Целью наших исследований являлось выявить особенности развития анатомических признаков стебля и оценить их влияние на продуктивность растений озимого и ярового рапса, разработать способ для ускорения селекционного процесса по признаку устойчивость к полеганию.

Рапс является многогранной, наукоемкой культурой настоящего и будущего. Из малоизученной кормовой культуры за почти столетия он стал основной маслично-белковой культурой многих

государств мира и Беларуси [1]. Урожайность рапса, как и других сельскохозяйственных культур, зависит от потенциальной продуктивности растений и условий их произрастания. Индивидуальная продуктивность генетически детерминирована и зависит от строения растений, темпов их развития и интенсивности физиологических процессов [2]. В селекции большое внимание уделяется строению растений при подборе родительских форм и оценке селекционного материала [3].

Малоиспользуемым из-за значительной трудоемкости в селекции растений является анатомический метод, позволяющий более полно изучить и оценить исходный материал (В. В. Пыльнев, 1997; С. В. Лазаревич, 1999; М. А. Ильинская-Центилович, К. Г. Тетерятченко, 1962). Анатомическое строение является следствием роста и развития на клеточном уровне, которые также зависят от экологических факторов [4]. За счет снижения высоты растений и увеличения прочности стебля была улучшена устойчивость их к полеганию. Прочность стебля, масса 1000 семян и продуктивность существенно уменьшается при полегании растения. В большей мере изменчивость обусловлена степенью полегания, чем генотипом [5]. На связь устойчивости стебля к полеганию с анатомо-морфологическими признаками обращали внимание многие ученые [6, 7, 8, 9].

Таким образом, можно предположить, что высота растений и особенности анатомического строения стебля являются определяющими признаками отбора генотипов рапса для создания устойчивых к полеганию сортов и гибридов.

Устойчивость растений к полеганию определяется развитием механических и проводящих тканей, конструкцией и топографией проводящих пучков, перераспределением потоков пластических веществ и смещение центра тяжести растений в период развития соцветий и семян [10]. Совершенствование методологии микроскопических исследований и микроскопической техники дает возможность проводить учет признаков анатомического строения вегетативных органов и устанавливать взаимосвязь с макроструктурой и продуктивностью растений. Исследования методом анатомического анализа стеблей у рапса не проводились, работа в этом направлении будет способствовать созданию высокопродуктивных, устойчивых к полеганию сортов и гибридов.

Основная часть

Исследования проводились в РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию» в 2020–2021 гг. Объектом исследований служили признаки отечественных и зарубежных сортов, перспективных образцов озимого и ярового рапса. В качестве контроля использовали районированные по Республике Беларусь сорта рапса: для озимого – Лидер, для ярового – Топаз. Почва опытного участка дерново-подзолистая, слабоподзоленная, развивающаяся на легком суглинке, подстилаемом мореной со следующей характеристикой пахотного слоя: гумус (по Тюрину) – 2,03–2,34 %; рН (в KCL) – 6,02–6,20 %; P₂O₅ – 205–245 мг/кг; K₂O – 218–252 мг/кг почвы (по Кирсанову).

Морфологический анализ растений проводился по «Методике оценки урожайности сортов озимого двунулевого рапса», путем отбора пробных снопов перед началом уборки культуры [11]. Закладку опытов, фенологические наблюдения, полевые учеты и оценку селекционных признаков сортов и образцов проводили индивидуально по каждой комбинации согласно методике Государственного испытания [12] и методике полевого опыта Б. А. Доспехова [13].

Отбор и фиксацию растительного материала проводили в фазу цветения по общепринятым методикам цитологических исследований [14]. Препараты изготавливали из средних частей второго междоузлия, что позволило унифицировать исследования и получить сопоставимые результаты. Поперечные срезы (толщиной 50–80 мкм), выполнялись вручную лезвием безопасной бритвы, окрашивали флороглюцином, который обеспечивает красно-бурую окраску лигнифицированных гистологических структур стебля, помещали их на предметное стекло, и накрывали покровным стеклом с добавлением глицерина. Изучение препаратов проводили в 3-кратном повторении, с использованием оптического микроскопа Nikon Eclipse 50i, видеокамеры Nikon DS-Fi1, преобразователя сигналов Nikon digital sight и компьютера. Статистическая обработка данных проводилась по общепринятым методикам [13] с использованием компьютерной программы Microsoft Excel.

Использованные в исследованиях сорта и образцы рапса были представлены озимыми и яровыми формами, близкими по морфотипу. Изменчивость их макроструктурных признаков в значительной мере определялась генетическими различиями изученных сортов и образцов. Определение влияния строения растений на хозяйственно-ценные признаки рапса методологически были разделены на три этапа: а) изучение особенностей макроструктуры стебля; б) изучение особенностей микроструктуры стебля; в) оценка влияния элементов макро- и микроструктуры стебля на продуктивность и устойчивость к полеганию сортов и образцов.

Высота растений в среднем по озимому рапсу составила 143,9 см, по яровому – 119,1 см. По сортам и образцам она изменялась от 118,7 до 155,6 см (озимый рапс), у ярового – от 100,9 до 130,9 см. (табл. 1). Положительная корреляционная связь (r) сильной степени выявлена у ярового рапса между высотой растения и высотой ветвления ($r=0,88$) и показателем количество стручков на центральной кисти ($r=0,78$). Корреляционный анализ подтвердил положительную связь средней степени между продуктивностью и длиной центральной кисти (озимый – $r=0,57$, яровой – $r=0,54$), а также количеством стручков на ней (яровой – $r=0,56$) и сильной степени ($r=0,77$) для озимого рапса. Это можно объяснить тем, что на более длинной центральной кисти образуется больше стручков и соответственно семян в них.

Устойчивость к полеганию является одним из наиболее значимых селекционно-ценных признаков рапса, которая определяется, во многом, комплексом гистологических и биохимических свойств растений и условиями их произрастания [15]. Устойчивые к полеганию сорта, имеют большую толщину механической ткани стебля, более крупный диаметр сосудистых пучков и их большей численностью, чем менее устойчивые или склонные к полеганию генотипы.

Таблица 1. Макроструктура и продуктивность растений озимого и ярового рапса, в среднем за 2020–2021 гг.

Сорт, образец	Высота, см		Длина центральной кисти, см	Количество стручков, шт.		Продуктивность, г
	растения	ветвления		на центральной кисти	на растении	
Озимый рапс						
Лидер (к.)	155,6	42,4	43,9	54,1	284,2	20,98
Адонис	118,7	28,5	40,5	59,7	191,1	16,70
Оникс	147,7	51,2	43,0	49,9	262,6	23,18
№12А-1	143,4	38,1	41,4	56,3	288,4	23,52
Лорис	133,9	52,3	38,0	45,3	230,6	17,93
№312А-1	148,6	19,7	48,6	50,0	247,4	18,74
№1516/20	147,3	16,7	46,1	60,8	442,1	26,64
№316/20	152,7	25,0	50,0	59,8	535,6	37,50
№1216/20-2	141,0	39,8	46,8	70,0	466,2	44,40
№1312/20	150,3	38,8	35,4	52,0	305,2	21,00
Среднее	143,9	35,3	43,4	55,8	325,3	25,06
Яровой рапс						
Топаз, (к.)	129,1	40,6	32,7	27,5	96,7	8,52
№20А-2	112,5	21,2	35,1	19,2	192,5	11,52
№15А-2	102,2	12,3	28,8	12,8	106,9	8,09
Верас	130,7	40,3	44,6	32,5	114,3	11,87
№14А-2	115,7	21,3	42,5	24,9	160,4	10,29
№67/20	121,3	21,0	47,3	35,0	230,8	14,01
№68/20	100,9	5,0	39,8	22,2	218,5	12,21
№86/20	128,6	25,6	57,1	42,1	213,7	12,08
№91/20	130,9	27,1	56,4	30,9	137,9	10,38
Среднее	119,1	23,8	42,7	27,5	163,5	11,00

Из микроструктурных признаков существенное влияние на прочность стебля оказывает развитие проводящей системы и периферического кольца склеренхимы. Большим числом проводящих пучков характеризовались толстостебельные образцы ярового рапса, например, №15А-2 (100,7 шт.), №68/20 (89,0 шт.) и сорт-контроль Топаз (81,0 шт.) и озимого – сорт Оникс и №1312/20. Наибольшее развитие склеренхимы наблюдалось у образцов озимого рапса – №1312/20 (606,2 мкм), №316/20 (597,6 мкм), ярового – сорт-контроль Топаз (625,6 мкм), образец №15А-2 (624,9 мкм). Выявлено, что озимые сорта и образцы имели меньшее количество рядов хлоренхимы – 6,7 шт. против 8,3 шт. у яровых образцов (табл. 2).

Микроскопический анализ конструктивных элементов, обеспечивающих прочность стебля, позволил выявить существенные различия между изучаемыми образцами яровых и озимых форм. Так, растения озимого рапса (образец №1516/20), которые отличались большим диаметром стебля (19,2 мм) имели минимальную толщину склеренхимного кольца (450,9 мкм). Образцы №1312/20 (озимый рапс) и №15А-2 (яровой рапс) наоборот имели малый диаметр стебля (14,0 и 6,1 мм соответственно) и толщина их склеренхимы составила 606,2 и 624,9 мкм. Установлена положительная корреляционная связь средней силы между продуктивностью растений и толщиной склеренхимного кольца у генотипов озимого рапса ($r=0,38$) и слабая отрицательная связь у образцов ярового рапса ($r=-0,17$) (табл. 3).

Таблица 2. Элементы прочности и устойчивости к полеганию стеблей озимого и ярового рапса (среднее за 2020–2021 гг.)

Сорта и образцы	Диаметр стебля, мм	Число проводящих пучков, шт.	Площадь проводящих пучков, мм ²	Толщина склеренхимного кольца, мкм	Тангентальный диаметр проводящих пучков, мкм	Удаление проводящих пучков от поверхности стебля, мкм	Кол-во рядов хлоренхимы, шт.	Уст-ть к полеганию, балл
Озимый рапс								
Лидер, (к.)	11,2	78,3	257,8	496,7	815,4	399,2	7,1	4,6
Адонис	13,1	79,3	269,5	503,5	839,6	404,1	7,4	4,9
Оникс	13,4	88,3	256,7	481,0	777,6	395,0	7,8	4,8
№12А-1	12,1	77,7	393,5	531,3	830,2	434,1	7,3	4,7
№312А-1	20,3	78,7	296,9	529,1	870,0	412,5	6,4	4,7
Лорис	11,4	74,0	342,5	460,7	950,4	368,1	6,9	4,3
№1516/20	19,2	77,3	245,0	450,9	707,6	356,2	6,6	4,8
№316/20	22,7	74,3	324,8	597,6	847,5	486,2	5,3	4,4
№1216/20-2	13,2	73,7	259,4	546,2	460,4	445,5	6,4	4,7
№1312/20	14,0	88,0	313,4	606,2	891,5	513,1	5,8	4,4
Среднее	15,1	79,0	296,0	520,3	799,0	421,4	6,7	4,6
Яровой рапс								
Топаз, (к.)	7,8	81,0	328,0	625,6	1018,8	525,8	11,6	4,6
№20А-2	7,9	37,0	378,3	407,0	929,8	332,4	6,8	4,4
№15А-2	6,1	100,7	260,6	624,9	855,8	513,1	8,4	4,3
Верас	7,5	52,0	243,8	574,8	850,9	473,5	9,0	4,5
№14А-2	8,9	54,0	320,9	406,9	1030,8	338,5	7,9	4,5
№67/20	10,6	79,7	185,2	581,2	804,5	455,5	8,4	4,2
№68/20	10,3	89,0	200,6	577,7	806,0	469,7	8,3	4,8
№86/20	9,7	66,7	282,2	579,3	918,5	454,5	7,3	4,5
№91/20	9,1	68,7	220,4	566,9	712,9	465,0	6,8	4,0
Среднее	8,7	69,9	268,9	549,4	880,9	447,6	8,3	4,4

Для оценки влияния основных признаков структуры стебля рапса на продуктивность растений и устойчивость их к полеганию следует использовать анализ корреляционных связей между ними. Между толщиной склеренхимного кольца и числом проводящих пучков выявлена тесная корреляционная связь у ярового рапса ($r=0,78$) и слабая у озимого ($r=0,13$).

Таблица 3. Линейная корреляционная связь продуктивности с признаками строения растений рапса

Коррелирующие признаки	r	
	Озимый рапс	Яровой рапс
Связь продуктивности с элементами макроструктуры растения:		
Продуктивность – высота растений	0,26	0,12
Продуктивность – высота ветвления	-0,11	-0,14
Продуктивность – длина центральной кисти	0,57	0,54
Продуктивность – количество стручков на центральной кисти	0,77	0,56
Продуктивность – количество стручков на растении	0,89	0,82
Продуктивность – диаметр стебля	0,29	0,76
Продуктивность – устойчивость к полеганию	-0,08	0,01
Связь продуктивности с элементами микроструктуры средней части второго междоузлия:		
Продуктивность – площадь проводящего пучка	-0,13	-0,43
Продуктивность – удаление проводящего пучка от поверхности стебля	0,36	-0,29
Продуктивность – число проводящих пучков	-0,43	-0,29
Продуктивность – тангентальный диаметр проводящего пучка	-0,76	-0,35
Продуктивность – площадь сосудов метаксилемы проводящего пучка	-0,14	0,31
Продуктивность – количество рядов хлоренхимы	-0,47	-0,37
Продуктивность – толщина склеренхимного кольца	0,38	-0,17
Взаимосвязь других элементов микроструктуры средней части второго междоузлия:		
Диаметр стебля – число проводящих пучков	-0,18	0,00
Диаметр стебля – толщина склеренхимного кольца	0,30	-0,07
Тангентальный диаметр проводящего пучка – площадь сосудов метаксилемы	0,59	0,77
Толщина склеренхимного кольца – устойчивость к полеганию	-0,39	-0,02
Толщина склеренхимного кольца – число проводящих пучков	0,13	0,78

Показано, что из макроструктурных признаков рапса на продуктивность ценоза положительно влияют длина центральной кисти, количество стручков на ней и на растении. Выявлена тесная связь между продуктивностью семян с растения и диаметром стебля ярового рапса ($r=0,76$). При увеличении тангентального диаметра проводящего пучка возрастала площадь сосудов метаксилемы ($r=0,59$ – озимый; $r=0,77$ – яровой). Следует отметить, что увеличение диаметра проводящих пучков и их сосудов целесообразно лишь в условиях достаточного увлажнения почвы. Поэтому в условиях Беларуси более продуктивными могут оказаться сорта (гибриды) с толстым стеблем и большим числом проводящих пучков среднего диаметра.

Таким образом, использование цитологических методов при отборе растений рапса на устойчивость к полеганию и по показателям продуктивности будет способствовать повышению результативности и ускорению селекционного процесса этой культуры.

Заключение

Реализация продуктивности и устойчивости растений рапса озимого и ярового к полеганию зависит от комплекса факторов эндогенного и экзогенного происхождения. Информационно-ценными для селекционного процесса являются сортовые особенности макро- и микроструктуры стебля. Исследованиями установлено, что при отборе образцов рапса следует уделять особое внимание генотипам, которые имеют большую толщину механической ткани стебля, более крупный диаметр сосудистых пучков и их большую численность, чем менее устойчивые или склонные к полеганию генотипы. Из микроструктурных признаков существенное влияние на прочность стебля оказывает развитие проводящей системы и периферического кольца склеренхимы. Выявлена связь сильной степени между продуктивностью семян с растения и диаметром стебля ярового рапса ($r=0,76$). Число проводящих пучков увеличивалось с утолщением склеренхимной ткани ($r=0,13$ – озимый; $r=0,78$ – яровой), а при увеличении тангентального диаметра проводящего пучка возрастала площадь сосудов метаксилемы ($r=0,59$ – озимый; $r=0,77$ – яровой). Отмечено, что увеличение диаметра проводящих пучков и их сосудов целесообразно лишь в условиях достаточного увлажнения почвы. Поэтому, в условиях Беларуси более продуктивными могут оказаться сорта (гибриды) с толстым стеблем и большим числом проводящих пучков среднего диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиллюк, Я. Э. Научные основы селекции и технологии возделывания рапса (*Brassica napus oleifera* Metzg.) в Беларуси: дис. ... д-ра с.-х. наук / Я. Э. Пиллюк. – Минск: ИООО «Право и экономика», 2021. – 80 с.
2. Прохоров, В. Н. Физиолого-экологические основы оптимизации продукционного процесса агрофитоценозов / В. Н. Прохоров, Н. А. Ламан, К. Г. Шашко, В. И. Кравченко. – Минск: ИООО «Право и экономика», 2005. – 365 с.
3. Бороевич, С. Принципы и методы селекции растений / С. Бороевич / Перевод с сербохорв. В. В. Иноземцева; под ред. и с предис. А. К. Федорова. – Москва: «Колос», 1984. – 344 с.
4. Huber H., Brouwer J., Wettberg E.J., During H.J., Anten N.P. More cells, bigger cell or simply reorganization? Alternative Mechanisms leading to changed internode architecture under co n-trasting stress regimes. *New Phytol.*, 2013, 201: 193–204.
5. Изучение прочности соломины у ржи *Secale cereal L.* методом динамического механического анализа / А. А. Коновалов [и др.]. – Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2013. – 5: 3–6.
6. Рабинович, С. В. Устойчивость против полегания образцов озимой пшеницы из мировой коллекции в условиях восточного степи / С. В. Рабинович, В. Ф. Дорофеев // Селекция семян. УРСР. – Киев, 1966. – В. 2. С. 23–32.
7. Декапрелевич, Л. Л. К методике оценки сортов озимой пшеницы на полегаемость и характеристика по этому признаку некоторых местных сортов Восточной Грузии селекционных сортов / Л. Л. Декапрелевич // В кн.: Устойчивость растения против полегания. – Минск, 1965. – С. 54–56.
8. Александрян, В. В. Определение показателя «стройности» стеблей злаковых / В. В. Александрян, А. П. Тарвердян // Докл. ВАСХНИЛ. – 1976. – № 10. – С. 15–16.
9. Лукьянова, И. В. Устойчивость к полеганию злаковых культур с учетом их архитектоники и физико-механических свойств тканей стеблей / И. В. Лукьянова. – Краснодар, 2008. – 282 с.
10. Лазаревич, С. В. Эволюция анатомического строения стебля пшеницы / С. В. Лазаревич. – Минск: БИТ «Хата». – 1999. – 296 с.
11. Методика оценки урожайности сортов озимого двунулевого рапса / ИНАР, – Познань, 1991. – 21 с.
12. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур / под ред. М. А. Федина. – Москва, 1988. – 121 с.
13. Dosepov, B. A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov isslidovani) (Methods of field experience with the basics of statistical processing of research results). – Moscow, 2011, 352 p.
14. Паушева, З. П. Практикум по цитологии растений / З. П. Паушева. – М.: Агропромиздат, 1988 – С. 61–66.
15. Лясковский, М. И. Динамика фенольных соединений и лигнина в стебле озимой пшеницы и формирование устойчивости к полеганию / М. И. Лясковский, Ф. Л. Калинин // Физиология и биохимия культурных растений. – 1997. – Т.9, № 4. – С. 359–365.