



С.В.Лазаревич, кандидат биологических наук
Белорусская сельскохозяйственная академия

УДК 633.11:635.072:621.814

Упругие свойства стебля пшеницы

Упругие свойства стебля пшеницы определяют устойчивость растений к полеганию и являются важным критерием сорта. Для их измерения было разработано устройство ИДУ. С его помощью были определены значения модуля Юнга у 9 видов пшеницы, имеющих разный набор хромосом.

В исследованиях выявлено влияние генотипа, места расположения междоузлия и места проведения измерений на нём на упругие свойства стебля. Установлена связь упругости стебля с его внутренним строением. Значения модуля Юнга возрастают при увеличении числа проводящих пучков и утолщении периферического слоя склеренхимы. Онтогенетические преобразования стебля в период от начала цветения до уборки усиливают его устойчивость к поперечным деформациям.

Выявленные особенности могут быть использованы в селекционном процессе.

Важным приспособлением высших растений к обитанию в наземной среде явилось развитие у них комплекса тканей и анатомических структур, обеспечивающих прочность их осевых и боковых органов, устойчивость к механическим нагрузкам. Прочность стебля злаков имеет большое хозяйственное значение и в связи с биологизацией земледелия становится объектом углубленных научных исследований [1, 2, 3, 4].

У пшеницы, как и у ряда других зерновых культур, прочность стебля определяется комплексом признаков анатомического строения [1, 5, 6, 7], его химического состава [1, 8], а также условиями произрастания [1, 9, 10].

Прочность стебля и устойчивость к полеганию являются обязательными критериями качества сорта пшеницы. Для оптимизации их оценки в селекционном процессе используется ряд методов, основанных на изучении упругих свойств стебля и его анатомических структур

Elasticity of a wheat stem defines resistance of crops to lodging and is an important criterion of a variety. For its measuring the device DDE was designed. Values of the module Young of nine wheat varieties having different chromosome set were defined with the device.

As a result of the research the influence of a genotype, interknot location and the place of its measuring on the elasticity of a stem were defined. Relationship between stem elasticity and its inner composition was determined. Parametres of the Young module rise with increasing the number of conducting bunches and thickening peripheral layer of sclerenchyma. Ontogenetic transformations of the stem in the period from flowering to harvesting intensify its resistance to cross deformations.

He described characteristics can be used in the process of selection.

тур [1, 11]. В последние годы предложена оценка прочности стебля на основе анализа эластичности склеренхимы ультразвуковым методом [7, 12] и определения модуля Юнга с использованием голографической интерферометрии [13]. Большинство из этих исследований было проведено на вторых снизу междоузлиях у культивируемых пшениц. Упругие же свойства других междоузлий и их частей у видов полиплоидного ряда пшеницы, а также их онтогенетическая изменчивость изучены недостаточно полно. Вместе с тем знание этих свойств имеет значение для планирования селекционных программ, а также для детализации важнейших направлений эволюции рода *Triticum L.*

Материал и методика. Упругость стеблевых метамеров оценивалась с помощью модуля Юнга (Е), который связывает нормальное напряжение и относительное удлинение материала при его деформации [14]. Для измерения модуля нами было разработано приспособ-

ление ИДУ, в котором наличие подвижной и неподвижной опор позволяло производить измерения на участках стебля разной длины. Система сменных грузиков была удобной в дезировании нагрузки (F). В ИДУ величина F измерялась в граммах, длина изучаемого участка стебля (l) – в сантиметрах, стрела прогиба (λ) – в сантиметрах. Наружный (R) и внутренний (r) радиусы соломины измерялись в миллиметрах с помощью микрометра или штангенциркуля. Для получения значений модуля упругости в единицах системы СИ была использована рабочая формула

$$E = \frac{26 \cdot F \cdot l^3}{(R^4 - r^4) \cdot \lambda}$$

Значения E выражались в гигапаскалях (1 ГПа = $1 \cdot 10^9$ Па).

Измерения выполнялись в середине каждого из 2–4-го междоузлий дважды: при наличии листового влагалища и без него. В подколосовом междоузлии измерения были проведены в верхней (вариант 1В), средней (1С) и нижней (1Н) части после удаления с неё листового влагалища.

Упругость стеблей измерялась в начале цветения растений, поскольку эта фенофаза определяется достаточно точно, а после цветения часто отмечается начало полегания хлебов. Кроме того, были проведены дополнительные измерения в фазу полной спелости зерна.

Объектами исследования служили виды пшеницы из коллекции ВИР и ENSAT (Франция):

диплоиды – *T.monococcum* L. (к-46750 ВИР), *T.sinskajae* Filat. et Kurk. (к-48993 ВИР); тетраплоиды – *T.dicoccum* Kom. (к-5201 ВИР), *T.timopheevii* Zhuk. (к-20541 ВИР), *T.durum* Desf. "Augusto" (к-58089 ВИР), *T.durum* Desf. "85-SA-46" (п.46 ENSAT); гексаплоиды *T.spelta* L. (к-15016 ВИР), *T.aestivum* L. "Pavon" (п.8 ENSAT), *T.zhukovskyi* Men. et Er. (к-43062 ВИР); октоплоид *T.timonovum* Heslot et Ferrary (к-43065 ВИР).

Исследования проводились в полевых условиях в 5-кратной повторности с последующим дисперсионным и корреляционным анализом [15] полученных значений.

Результаты и обсуждение. Стебель пшеницы характеризуется анизотропностью, обусловленной его анатомическим строением [7, 11]. Наличие небольших периферических проводящих пучков, обслуживающих хлоренхиму, крупных пучков в паренхиме стебля, кольца склеренхимы перициклического происхождения обеспечивает высокую устойчивость стебля против постоянно возникающих осевых нагрузок. Упругие свойства стебля усиливаются также благодаря ритмическому чередованию крупных и малых пучков и наличию у крупных пучков склеренхимных обкладок, хорошо развитых со стороны ксилемы и флоэмы [7].

Анатомическая и физиологическая неоднородность стеблевых частей метамеров оказывает сильное влияние на их упругие свойства. В подколосовом междоузлии пшениц значения модуля E возрастают от его верхней части (вариант 1В) к середине (1С), а затем снова уменьшаются в нижней (1Н) части (табл.1). Двухфакторный дисперсионный анализ выявил на 1%-ном

Таблица 1. Величина модуля упругости в разных частях подколосового междоузлия у видов пшеницы (ГПа)

Вид	Вариант		
	1В	1С	1Н
<i>T.monococcum</i>	1,6	4,5	1,6
<i>T.sinskajae</i>	1,6	6,1	4,2
<i>T.dicoccoides</i>	2,4	9,2	1,1
<i>T.timopheevii</i>	1,9	5,5	1,4
<i>T.durum</i> "Augusto"	1,5	3,0	1,2
<i>T.durum</i> "85-SA-46"	1,5	2,3	2,9
<i>T.spelta</i>	2,0	2,8	0,2
<i>T.aestivum</i> "Pavon"	1,0	2,4	0,8
<i>T.zhukovskyi</i>	2,7	4,6	0,9
<i>T.timonovum</i>	2,4	3,9	2,8

$nCP_{05} = 1,3$ (ГПа)

Таблица 2. Значение критериев F в дисперсионном анализе модуля упругости, определенного в разных частях подколосового междоузлия

Дисперсия	$F_{факт.}$	F_{01}
A (разнообразие генотипов)	11,20	2,59
B (место измерения модуля E)	117,00	4,82
AB (взаимодействие факторов)	9,21	2,36

уровне значимости существенность этих различий (табл.2). При этом отмечается генотипическая обусловленность упругих свойств стебля у видов пшеницы (факторы A и AB). Изменение значений модуля E в разных частях верхнего междоузлия определяется увеличением выполненности стебля в верхней и нижней его частях за счёт паренхимы, которая имеет менее плотное сложение по сравнению с проводящими и механическими тканями. Кроме того, в нижней части междоузлия ростовые процессы в начале цветения растений не завершены и клетки отличаются слабой лигнификацией стенок. Относительно низкие значения E в верхней части подколосового междоузлия создают предпосылки поникания колоса.

Упругие свойства нижерасположенных междоузлий определяются происхождением изучаемых видов, особенностями их анатомического строения, степенью селекционной проработанности образцов. Например, у пшениц ряда *T.timopheevii* (*T.timopheevii*, *T.zhukovskyi*, *T.timonovum*) модуль E возрастает от второго сверху к нижнему междоузлию (табл.3). У мягкой же пшеницы сорта Pavon значение модуля упругости сначала возрастает от 2,4 до 4,0 ГПа от подколосового ко второму сверху междоузлию, а затем снижается до 2,2 ГПа в четвертом сверху междоузлии. Это приводит к возможности деформации нижнего междоузлия и полегания растений при нарушении агротехники сорта. Значимость влияния генетических особенностей образцов, порядкового номера междоузлия и взаимодействия этих факторов доказывается дисперсионным анализом (табл.4). При этом индекс детерминации варьирования значений модуля E под влиянием генетических факторов (η^2) был равен 72,7%.

Таблица 3. Величина модуля упругости в средних частях междоузлий у видов пшеницы (ГПа)

Вид	Междоузлие (сверху-вниз)			
	1	2	3	4
<i>T.monococcum</i>	4,5	5,5	6,4	5,8
<i>T.sinskajae</i>	6,1	4,3	3,4	–
<i>T.dicoccoides</i>	9,2	4,3	4,0	3,2
<i>T.timopheevii</i>	5,2	2,8	4,4	6,5
<i>T.durum</i> "Augusto"	3,0	2,9	2,0	–
<i>T.durum</i> "85-SA-46"	2,3	3,6	3,1	–
<i>T.spelta</i>	2,8	2,3	4,4	3,8
<i>T.aestivum</i> "Pavon"	2,4	4,0	3,6	2,2
<i>T.zhukovskyi</i>	4,6	2,8	4,0	6,6
<i>T.timonovum</i>	3,9	3,6	6,3	10,7

НСР₀₅=1,7 ГПа

Таблица 4. Значение критериев в дисперсионном анализе модуля упругости в средних частях междоузлий разных видов пшеницы

Дисперсия	F _{факт}	F ₀₅
A (разнообразие генотипов)	20,20	1,97
B (изучаемое междоузлие)	3,02	2,70
AB (взаимодействие факторов)	9,99	1,63

Упругие свойства стебля пшеницы в фазу начала цветения почти не зависят от длины междоузлия ($r=0,13$). Вместе с тем связь между модулем упругости, диаметром соломины в середине междоузлия и числом проводящих пучков, расположенных в паренхиме стебля, значима на 1%-ном уровне: $F_{\phi}(11,98) > F_{01}(5,78)$. Множественный коэффициент корреляции этих признаков (R_{y-xz}) был равен 0,73. На величину модуля E оказывала также влияние толщина стенок соломины и периферического слоя склеренхимы, а также диаметр её

клеток. Наличие листового влагалища достоверно на 1%-ном уровне значимости уменьшает упругость стебля. В среднем по всем изученным образцам снижение составило 18,9%. Это явление можно объяснить увеличением диаметра стеблевых метамеров за счёт тканей листа, имеющих более рыхлое, по сравнению со стеблем, сложение. По окончании цветения у пшеницы наряду с формированием и созреванием зерна происходят качественные преобразования в стебле. Отмечается снижение активности фотосинтеза и дыхания в клетках хлоренхимы стеблевой части метамеров. Интенсифицируется синтез лигнина и отложение его в клеточных стенках первичной коры и основной паренхимы, расположенной между кольцом склеренхимы и крупными проводящими пучками. После кратковременной активизации деятельности интеркалярной меристемы после цветения прекращаются ростовые процессы в стебле. Эти онтогенетические гистологические преобразования приводят к значительному увеличению упругих свойств стебля. Прирост значений модуля упругости в период от начала цветения до полного созревания составил у изученных пшениц в среднем 90,4% (табл.5) с варьированием от 7,8% (*T.monococcum*, третье сверху междоузлие) до 257,1% (*T.zhukovskyi*, второе сверху междоузлие).

Виды пшеницы достаточно полно сохраняют при созревании соотношение значений модуля упругости в разных междоузлиях. Коэффициент парной корреляции между величиной E в период цветения и в период уборки был достаточно высоким ($r=0,70 \pm 0,16$) и существенным на 1%-ном уровне значимости. Наличие этой связи указывает на возможность оценки упругих свойств стебля у пшеницы до уборки, требующей в селекционном процессе больших затрат ручного труда.

Таблица 5. Значение модуля упругости (E) стебля у видов пшеницы в период цветения и уборки (ГПа)

Вид	Междоузлие (сверху-вниз)	E		
		цветение	уборка	Прирост E в %
<i>T.monococcum</i>	1	4,5	7,2	60,0
	2	5,5	8,8	60,0
	3	6,4	6,9	7,8
	4	5,8	11,5	98,3
<i>T.timopheevii</i>	1	5,5	8,6	56,4
	2	2,8	5,7	103,6
	3	4,4	7,4	68,2
	4	6,5	9,2	41,5
<i>T.durum</i> "Augusto"	1	3,0	5,6	86,7
	2	2,9	5,5	89,7
	3	2,0	3,7	85,0
<i>T.spelta</i>	1	2,8	5,3	89,3
	2	2,3	6,1	165,2
	3	4,4	7,7	75,0
	4	3,8	9,6	52,6
<i>T.aestivum</i> "Pavon"	1	2,4	4,9	104,2
	2	4,0	8,4	110,0
	3	3,6	6,5	80,6
<i>T.zhukovskyi</i>	1	4,4	10,2	131,8
	2	2,8	10,0	257,1
	3	4,0	7,5	87,5
	4	6,6	11,8	78,8

НСР₀₅(E)=2,3 ГПа

Таким образом, проведенные исследования выявляют' генотипическую обусловленность модуля упругости стебля, его зависимость от анатомических особенностей междоузлий и их возрастных структурных преобразований. Эти обстоятельства должны учитываться при планировании селекционной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорощеев В.Ф., Пономарев В.И. Проблема полегаия пшеницы и пути её решения. ВНИИТЭИСХ МСХ СССР. – М., 1970. – 124 с.
2. Easson D.L., White E.M., Pickles S.J. A study of lodging in ce reales.// HGCA Project Report. – London, 1992. – P.52–77.
3. Crook M.J., Ennos A.R. Stem and root characteristics associa ted with lodging resistance in four winter wheat cultivars.// Journal of Agricultural Science. – 1994, 123:2. – P.167–174.
4. O'Dogherty M.J., Huber J.A., Dyson J., Marchall C.J. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw.// Journal of Agricultural Engineering Research. – 1995, 62:2. – P.133–142.
5. Раздорский В.Ф. Анатомия растений. – М.: Советская наука, 1949. – С.453–472.
6. Гулян А.А. Анатомо-морфологические особенности стеблей различных по устойчивости к полегаию сортов пшеницы и исследование их в гибридном потомстве.: Автореф. канд. дисс. – Ереван, 1972. – 29 с.

7. Lazarevitch S. Etude histogenetique du genre *Triticum* L. DRU INP-ENSAT. – Toulouse. 1995. – 64 p.

8. Лясковский М.И. Полегание злаков и пути его предотвращения.// Физиология и биохимия культурных растений. – 1991. 23:4. – С.315–328.

9. Ильинская-Центилович М.А. Устойчивость к полеганию как проблема селекции озимой пшеницы.: Автореф. докт. дисс. – Харьков, 1964. 48 с.

10. Gawda H., Trebacz H. Determining of the influence of agrotechnical conditions on elasticity of cereal stalk material from ultrasonic measurements.// Physical properties of agricultural materials and products. – New York, 1988. – С.133–138.

11. Тетерятченко К.Г. Анатомический метод оценки исходного материала мягкой озимой пшеницы на продуктивность, морозостойкость и устойчивость к полеганию// Научно-технический бюллетень ВИР им. Н.И. Вавилова. – Л., 1984:146. – С.28–32.

12. Dolinski R. The inheritance of elastic properties of the stem sclerenchyma in winter wheat hybrids (*Triticum aestivum* L.).// *Genetica Polonica*. – 1990, 31:3–4. – С.199–204.

13. Brozman D. Navrh metody pre urcenie Youngovho modulu pruznosti v tahu stebiel obilnin pomocou holografickej interferometrie.// *Zemedelska Technika*. Nitra. – 1990, 36:9. – С.535–538.

14. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. 15-е изд., перераб. – М.: Наука, 1976. – С.26–38.

15. Доспехов Б.А.// Методика полевого опыта. 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – С.207–307.
