

О.М. Грив, доктор биологических наук  
Институт земледелия и селекции НАН Беларуси  
УДК 633.16:547.466.46

## Селекция высоколизинового ячменя: результаты и перспективы

*Изложены подходы и методы селекции высоколизинового ячменя, предлагается усовершенствованная технология селекционного процесса, сформулирована модель сорта кормового назначения, представлена характеристика образцов конкурсного испытания.*

Согласно международному классификатору *Hordeum vulgare* содержание лизина в белке ячменя варьирует от 1,9% (крайне низкое) до 3,99% (очень высокое) [2]. Открытие лиз генов расширило границы вида по этому показателю до 5,5%, в редких случаях – до 6,5%.

Высоколизинность как селекционируемый признак характеризуется следующими особенностями:

- контролируется одним регуляторным рецессивным геном лиз 3, локализованным в 7-й хромосоме, который вносит изменения по многим позициям состава и структуры зерновки; повышает накопление лизинбогатых индивидуальных белков альбуминовой и глобулиновой фракций и блокирует синтез гордеиновой фракции, бедной лизином. Этот ген создает эффект коромысла в эволюционно сложившейся структуре зерновки;

- доминантная аллель этого гена (по гордеиновым белкам) проявляется на гибридных зерновках в год опыления, т.е. контролируется генотипом вновь образованного эмбриона, а не генотипом материнского растения, как, например, общее содержание белка или остиность.

В качестве селекционной стратегии для создания высокоурожайных и высоколизинных сортов зерновых культур сорго, кукурузы и ячменя биохимик Ларс Мунк [1] предлагает следующее:

- поиск новой генетической среды для главных высоколизинных генов с целью модификации вредной части плейотропного эффекта;

- отыскание методами массового скрининга новых главных биохимических мутантов с улучшенными агрономическими характеристиками;

- идентификацию и сочетание в одном генотипе генов, слабо влияющих на аминокислотный состав в отдельности. Благодаря аддитивному действию они могут дать значительный эффект, не снижая урожайности [1]. Выполнить эти три позиции возможно при наличии аминокислотного анализатора.

Основными недостатками высоколизинового ячменя, требующими селекционного решения, являются: низкая масса 1000 зерен; отсутствие стабильности экспрессии гена лиз 3; наличие вмятинки, снижающей сыпучесть зерна, что важно учитывать при посеве.

Целью проведенных исследований была разработка селекционной технологии для высоколизинового ячменя.

Основным методом работы с высоколизинным ячменем считалась донорная селекция с использованием

*The article provides the approaches and methods of selecting the high-lysine barley, suggests the improved technology of selection and multiplication process, formulates the model of the norm-creating variety.*

прерывистого или непрерывного беккроссов. При этом ставилась задача найти нужный генотип реципиента для наилучшей экспрессии гена лиз 3. Несмотря на прилагаемые усилия многих селекционеров разных стран, это направление не дало желаемых результатов. Районированные в Дании сорта высоколизинового ячменя Пигги и Лиза-Макс являются популяциями по зерну. Зерна с вмятинкой в полученных репродукциях 1998 г. Пигги и 2000 г. Лиза-Макс составляли 16 и 26% соответственно.

В таблице 1 представлена характеристика некоторых образцов ячменя признаковой коллекции по морфотипу куста и колоса, массе зерна, наличию вмятинки и содержанию лизина. Первые два образца Хайпроли и K27344 являются донорами гена лиз 1, высоколизинность остальных обусловлена геном лиз 3. Формулу морфотипа куста в фазу полного кушения оценивали визуально по 9-балльной шкале [2]. Сорта Лиза, Паша, Са700202 и Пигги имеют сходный между собой полустелющийся морфотип куста в фазу кушения, обладают высокой кустистостью и устойчивостью к плотному моноценозу. Этот комплекс слагаемых морфотипа куста контролируется одним рецессивным геном *sdw*. Образец под названием Марко вышеупомянутый комплекс слагаемых наследует доминантно. Ген *sdw* оказывал плейотропное действие на массу зерна у сортов Диамант, Надя и т.д. У Марко этого влияния нет, масса 1000 зерен составляет 55 г. Линия Ад27 высокорослая, голозерная, безостая, консервативно наследует признаки в ряду гибридных поколений, имеет длинное, узкое зерно и высокое содержание белка (17%). Из комбинации Ад27 x Лиза выделено 14 линий с прямостоячим морфотипом куста (доминантным и полудоминантным наследованием), длинной формой зерна с вмятинкой. Эти линии (573-585) несколько лет сохраняли 100%-ную вмятинку, тогда как остальные за год накапливали разный процент зерен без вмятинки (2-20). В условиях сухого и жаркого лета 1999 г. и после него многие из них тоже обнаружили зерна без вмятинки, за исключением линии 580. В коллекции имеются остистые и безостые многорядные и двухрядные. Каждый год в коллекции изучалось 90-150 разных линий, высоколизинные высевались только зернами с вмятинкой.

В таблице 2 показана динамика изучения лизинных линий в 1991-1993 гг. В 1991 г. 503 образца изучались в питомнике площадью делянки 3 м<sup>2</sup>, в 1992 г. – 97 образцов в питомнике площадью 5 м<sup>2</sup> и в 1993 г. – всего 51 линия на

Таблица 1. Характеристика образцов признаковой коллекции

Образцы	Происхождение	Формула куста, 1-9 баллов				Дата выкопашивания	Морфотип колоса				Зерновка					Содержание, мг/100 г	
		форма куста	кущевые	интенсивность роста	ксероморфность		2х р.	мн	ост	б/о	лп	гол.	масса, г	вмят (1999 г.), %	вмят (2000 г.), %		
Хайпроли К 27344	Эфиопия Минский х Хайпроли	3	3	5	6	14	+		+			+	+	39	82	49	661
Лиза Са 700202	Л134 х км 1057 Швеция	3	3	6	6	23	+		+			+		38	84	32	558
Паша Пигги	Л1435хрег295 Са 700202	5	5	5	5	21	+		+			+		32	82	45	759
Л-26 эр 573	1435 х 66 Ад27хЛиза	5	5	4	4	18	+		+			+		36	98	56	880
569-2	.....	5	5	6	5	24	+		+			+		38	70	83	1140
574	.....	3	5	3	5	27		+		+		+		36	-	56	
575	.....	3	3	6	5	20	+			+		+		28	0	0	419
576	.....	3	3	7	6	20	+			+		+		35	100	93	1070
577	.....	3	3	7	6	20	+			+		+		42	100	6	1160
578	.....	5	5	4	4	23	+			+		+		32	65	37	433
579	.....	3	3	7	5	20	+			+		+		37	98	88	1040
580	.....	3	4	5	5	20	+			+		+		35	100	90	1028
581	.....	3	4	6	5	18	+			+		+		30	95	78	1060
582	.....	3	3	4	5	18	+			+		+		36	100	96	110
583	.....	3	3	5	5	16	+			+		+		35	100	80	1230
584	.....	3	3	4	5	20	+			+		+		36	100	100	1180
627	Упругая сол.	3	3	6	5	18	+			+		+		30	80	61	1460
608	Одностебельная	3	3	6	5	21	+			+		+		37	95	80	1030
Grosso mlo	Голландия	3	3	5	5	24	+			+		+		30	100	77	1050
Ад27	К-19991 х К-26692	3	3	6	5	18	+			+		+		34	98	74	984
Run 8/453	Чехия	3	3	5	5	18	+			+		+	+	32,7	100	72	1255
59	Са 700202 х К-27344	4	4	6	6	18	+			+		+			0	0	507
633	Са 700202 х Вежа	1	1	6	6	14		+				+		40	0	0	462
Марко		3	4	5	4	18	+			+		+		57	0	0	440
		3	3	7	5	21	+			+		+		37	0	0	570
		3	3	6	5	23	+			+		+		46	0	0	467
		3	3	6	5	23	+			+		+		37	81	81	947
		7	5	4	4	24	+			+		+		32		91	870
		7	5	4	5	23	+			+		+		55	0	0	450

Примечание: рег295-регенерант 295 из линии км1057Чехия

делянках 10м<sup>2</sup>. Линию Са700202 скрестили с линиями 136, 76, 182, полученными с участием Хайпроли. Линии 136 и 182 характеризуются доминантным морфотипом куста, крупным (49-50 г) зерном, повышенным содержанием белка в зерне (14-15 %), которое доминантно наследовалось. Линия 76 имела эректоидный морфотип (рецессивный), среднюю массу зерна (46,0 г) и 15,6 % белка в зерне. Среди отобранных в 1991 г. линий из комбинаций Са700202 x 136 и Са7007202 x 182 с высоким содержанием лизина и более крупным зерном, чем у Са700202, степень реверсии составила 38-77 % (в пределах одного образца), тогда как у линий комбинации Са700202 x 76 этот показатель был на уровне 9,2-16,0 %.

Следовательно, при донорной селекции с рецессивно наследуемым признаком генотип акцептора должен быть компетентным для экспрессии донорного признака в биохимическом, энергетическом и генотипическом аспектах;

– акцептор не должен содержать сильных доминантных регуляторных генов альтернативного донорному признаку;

– акцептор должен иметь максимально выраженный признак, компенсирующий снижение урожая. В нашем случае таким признаком была продуктивная кустистость.

В конкурсном сортоиспытании 2000 г. изучались урожайного направления, высокобелковые и лизиновые образцы (табл. 3). Все образцы урожайного направления имеют сходный морфотип с формулой 1 3 5 (6) 5, кроме сорта Сябра и линии 489. С помощью теста Ньюмана прочитали достоверность различий по урожаю и массе 1000 зерен. По урожаю в первой группе сортообразцов достоверных различий не выявлено, а по массе 1000 зерен все генотипы разделены на три группы (А, В, С). При этом следует отметить, что образец 489 имеет полустелющийся морфотип и высокую массу зерна. Значит, связь между развалистой формой куста и массой зерновки преодолена полностью. Все лизиновые образцы имеют полустелющийся морфотип с формулой 5 4 (5) 4 (3) 5. Линии характеризуются низкой массой зерна (36,7-39,3 г/1000 зерен), за исключением 479, у которой этот показатель составляет 42,2. Характерным для 2000 г. является то, что линии с геном лиз3 имеют очень высокое содержание лизина (81,5-104,3 мг/100 г), а также высокий процент лизина в белке (5,7-6,7). Количество лизина в 10 зернах высокоурожайные линии содержат 18,5-24,2 мг, а лизиновые, несмотря на низкую массу зерна, – 23,0-44,0 мг. По цвету муки урожайные характеризуются 1-3 баллами, а лизиновые – 7-8. Цвет муки обус-

ловлен наличием каратиноидов. По сбору лизина урожайные линии показали 10,7-16,3, а лизиновые – 12,1-18,1 кг/га. Следует отметить, что в пределах урожайных сортообразцов встречаются зерна с вмятинкой до 1-5 %. Возможно, это засорение прошлых лет, но велика вероятность, что могло произойти свободное переопыление. По нашим наблюдениям, отдельные сортообразцы в отдельные годы цветут открыто и выбрасывают пыльники до 15 % колосьев на деланке, причем как урожайные, так и лизиновые. Следовательно, лизиновые сортообразцы необходимо изучать отдельно (с пространственной изоляцией) от урожайных.

Полустелющийся морфотип, обусловленный геном *sdw* (от Диаманта), сыграл большую роль в селекционной продвинутой культуре ячменя, в решении проблемы полстанья и повышении потенциальной продуктивности от 3 до 6т/га. [4]. Однако районированный сорт Наля, с таким морфотипом, в производстве быстро терял урожайность. Вероятно, этот морфотип и для лизинового ячменя должен быть или будет промежуточным или ген *sdw* будет переведен на доминантный уровень.

В таблице 4 представлена характеристика двух лизиновых сортообразцов Лиза и Паша в сравнении с сортом Сябра за ряд лет. Оба лизиновые сортообразца достоверно уступают по урожайности стандартному сорту Сябра. В среднем за три года урожайность составила 80,5 и 81,0 % от стандарта. По сбору лизина Лиза и Паша превосходят сорт Сябра в среднем за три года на 41,0-62,5 %.

**Перспективы высоколизинового ячменя.** Кормовое направление селекционных исследований у культуры, которая на 85 % используется на корм, является перспективным и актуальным. Чтобы повысить технологичность селекционного процесса высоколизинового ячменя, необходимо:

– совместить ген лиз 3 с доминантным морфотипом растения;

– перевести рецессивный ген лиз 3 на среднедоминантный, а затем и доминантный уровень.

Модель сорта кормового ячменя включает в себя 16 показателей (табл. 5). Прежде всего детерминированный аминокислотный состав белка по соотношению глутаминовая аминокислота: лизин, определяющему сбалансированность белка по лизину,  $Q=4,5 \pm 0,5$ . При этом ген лиз 3 должен быть как минимум среднедоминантным (+-). Сорт должен иметь простратный морфотип растения, при этом возможны три морфотипа куста в фазу кушения: а-1365-полу – или доминантный; б-5535-полудоминантный; и в-

Таблица 2. Динамика изучения лизиновых линий за три года

Комбинация скрещивания	Доля изучаемых линий, %		
	1991 г. – 3 м <sup>2</sup>	1992 г. – 5 м <sup>2</sup>	1993 г. – 10 м <sup>2</sup>
16x67	15,06	9,27	5,88
191x67	13,5	15,46	11,76
16x79	18,92	10,2	1,96
Са700202x136	3,86	9,27	0
Са700202x76	42,5	48,45	80,4
Са700202x182	6,17	7,22	0
Число линий	503	97	51

Таблица 3. Характеристика образцов конкурсного испытания, 2000 г.

Делянки	Формула морфотипа куста, 1-9 баллов				Урожай- ность, ц/га	Масса зерна, г/1000 зерен	Сод. белка, %	Содержание лизина			Цвет муки, балл 1-9	Сбор лизина, кг/га	Вмя- тинка, %
	форма куста	инт-сть кущения	инт-сть роста	мезо- морф.				мг/100 г	% к N	мг в 10 зерн.			
Гонар	1	2	5	5	31,4	53,9В	12,7	379	2,9	20,4	2	11,9	-
Павлин	1	2	6	5	29,8	53,4В	13,5	389	2,8	20,7	2	11,7	2
475	1	3	6	5	31,9	50,2С	12,8	370	2,8	18,5	3	11,8	-
500	1	3	5	5	21,4	47,4	16,4	423	2,6	20,0	1	9,4	5
498	1	3	5	5	30,7	52,9В	13,0	399	3,0	21,1	2	12,2	2
499	1	3	5	5	28,2	52,8В	13,2	380	2,8	20,0	2	10,7	1
473	1	3	6	5	29,2	54,0В	13,7	411	3,0	22,2	2	12,0	4
470	1	3	5	5	31,1	54,4А	14,8	389	2,8	21,1	2	12,1	-
501	1	3	5	5	32,0	54,2В	12,9	398	3,3	22,7	1	12,7	-
489	5	5	4	5	37,0	55,1А	12,4	441	3,5	24,2	2	16,3	4
Сябра	5	4	5	5	27,3	49,5С	12,9	418	3,2	20,7	2	11,5	-
Лиза	5	4	3	5	17,1	37,5	13,7	707	5,1	23,0	7	12,1	48,8
497	5	4	4	5	16,4	37,3	14,0	949	6,7	35,4	7	15,7	65,3
486	5	4	3	5	13,6	36,7	14,0	907	6,4	33,3	8	3,0	71
478П	5	5	4	5	19,7	37,7	14,1	815	5,7	30,7	7	16,2	76
477	5	4	4	5	17,6	38,2	13,8	874	6,3	33,3	7	15,4	64
484	5	5	4	5	16,8	37,0	13,7	816	5,9	30,2	8	13,7	79
483	5	4	4	5	21,2	39,3	13,9	852	6,1	33,4	8	18,1	77
472	5	5	4	5	14,0	38,4	15,5	1006	6,4	38,6	7	14,1	78
479	5	5	3	5	15,0	42,2	15,5	1043	6,7	44,0	8	15,6	78

Примечание. 1 - белая мука; 9 - темная мука

Таблица 4. Урожайность сортообразцов ячменя в конкурсном сортоиспытании

Показатели	Сорта	Годы изучения			Среднее	
		1997	1998	1999	ц/га	%
Урожайность, ц/га	Сябра	52,3	38,0	18,8	36,4	
	Лиза	44,8	29,0	14,2	29,3	80,5
	Паша	43,0	30,6	14,8	29,5	81,0
	НСР <sub>0,5</sub>	6,2	4,5	3,1		
Содержание лизина, мг/100 г	Сябра	354	381	418	38,4	
	Лиза	604	661	881	715	
	Паша	660	815	990	821	
Сбор лизина, кг/га	Сябра	18,5	14,5	11,5	13,9	
	Лиза	27,1	19,2	12,5	19,6	141,0
	Паша	28,4	24,9	14,6	22,6	162,5
	НСР <sub>0,5</sub>	6,7	5,8	2,2		

Таблица 5. Модель сорта кормового ячменя

Показатели	Скороспелый	Среднеспелый	Позднеспелый
Потенциальная урожайность, ц/га	40-50	50-60	65-70
Морфотип куста: а) 1365 б) 5555 в) 5535	++	++	+++
Плотность ценоза, колосьев/м	500-600	600-800	800-900
Устойчивость к полеганию, балл	6-8	6-8	7-9
Морфотип колоса: а) двухрядный б) многорядный	+	+	+
Масса 1000 зерен, г	40	42	44
Детерминированный геном лиз3 аминокислотный состав белка. Q = 4,5±0,5	++	++	+++
Содержание белка 14-15 %	++	++	++
Содержание каротиноидов, мг/100г	50	50	50
Утилизация минерального азота: а) до цветения б) после цветения	++ +	++ ++	++ +++
Медленное старение листьев в период налива	+	++	++
Высокий синергизм к основным сорнякам и доминирование в борьбе за элементы питания с ними	++	++	++
Устойчивость к главным болезням: а) Rup 8 б) mlo	++ ++	++ ++	++ ++
Высокий порог реагирования снижением урожайности на лимиты среды, обусловленный присутствием термошоковых белков	++	++	++
Хорошая обмолачиваемость, безостость	++	++	++
Товарный вид зерна	++	++	++

Примечание. Степень проявления признака: + – слабая, ++ – средняя, +++ – сильная

5555-доминантный. Морфотип "а" – скороспелый, "б" – позднеспелый, "в" – среднеспелый. Масса 1000 зерен в пределах 40-45 г и более, но при этом концентрация белка в зерне  $15 \pm 0,5\%$  независимо от условий выращивания. Корневая система должна обладать высоким синергизмом к основным сорнякам и доминировать в борьбе за элементы питания с ними. Медленное старение листьев

во время налива зерна может позволить проявиться высокой доле инлокации в общем транспорте метаболитов. Кормовой сорт должен быть безостым или с хорошо обмолачиваемыми остями, или с остевидными отростками. Зерно должно обладать длительным состоянием покоя. Вегетационный период защищен специальными генами от основных болезней. Система термошоковых белков

повысит порог реагирования на лимитирующие (температурные) факторы среды снижением урожайности. Зерно должно иметь товарный вид.

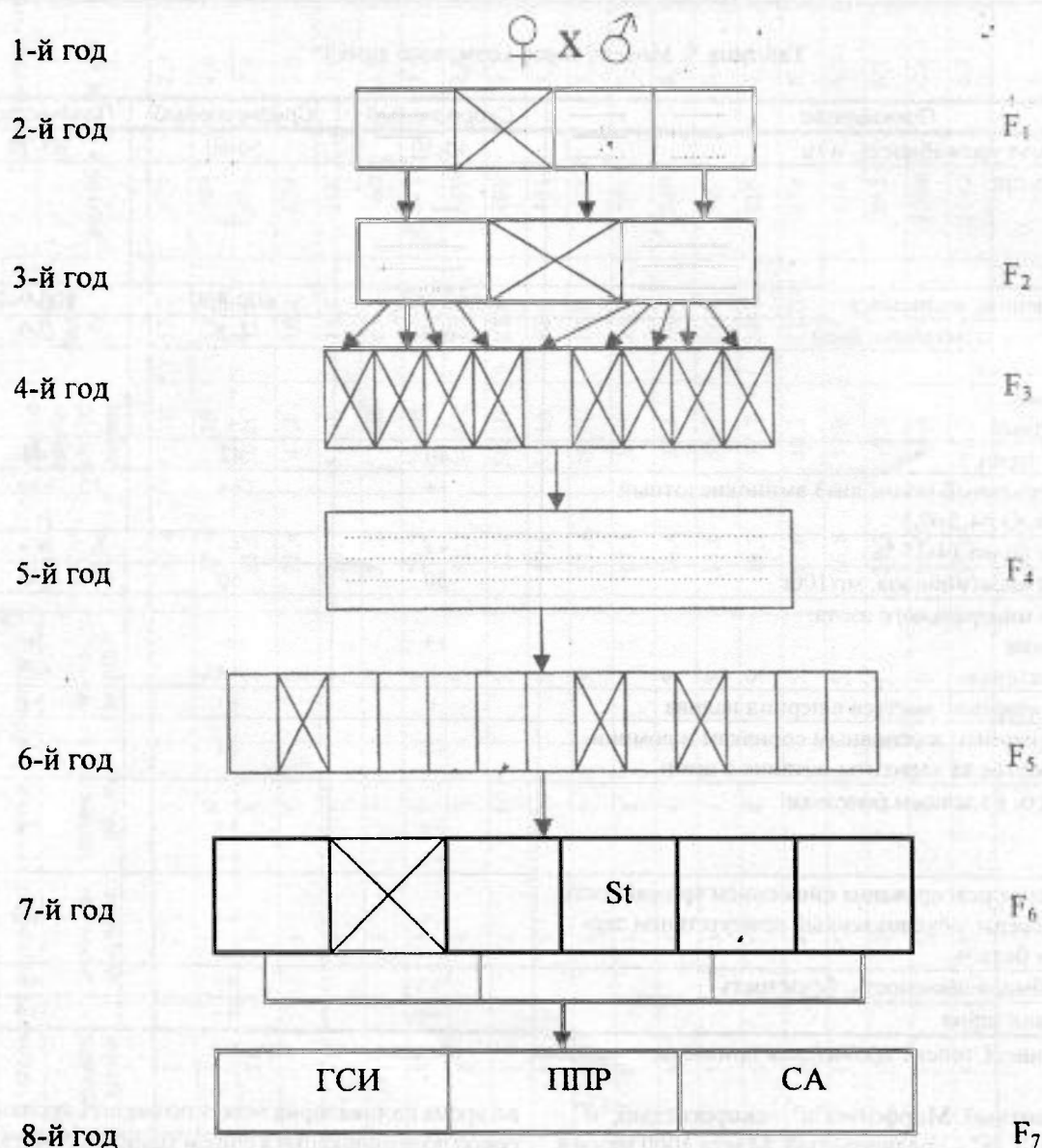
В связи с вышеизложенным технология селекционного процесса высоколизинового ячменя предполагает следующие этапы:

- подбор пар для гибридизации по методу рекомбинационного синтеза (5-8 комбинаций);
- отбор комбинаций скрещивания в F<sub>1</sub> по наследованию признаков: масса 1000 зерен и содержание лизина;
- отбор генотипов в F<sub>2</sub> по совокупности морфологических признаков и наличию вмятинки-морфологического маркера высоколизинового;
- отбор константных линий F<sub>3</sub> по морфологическим признакам и вмятинке на зерновке;

– лучшие линии (2-3) высеваются разреженно (можно в теплице) в количестве 1,5 тыс. зерен и убирается одна линия по растению в пакет – 1 тыс. растений F<sub>4</sub>;

– потомство каждого растения высевается на отдельных делянках – по семьям. При уборке оценивается на типичность, однородность по морфологическим признакам и стабильность по вмятинке. Бракуется от 15 до 50%. Делянки (семьи) убираются в отдельные пакеты;

– семьи F<sub>6</sub> (500 или более штук) высеваются на делянках 10-15 м<sup>2</sup>. Оцениваются на типичность, однородность и стабильность по вмятинке. В лабораторных условиях изучаются по содержанию лизина и белка в зерне. Сходные по морфологическим признакам и биохимическим показателям объединяются. Один образец уже в 6-м поколении будет занимать 0,5-0,7 га. При урожайности 30 ц/га бу-



СА – сортовая агротехника;

ППР – питомник предварительного размножения.

Рис. 1. Предлагаемая схема селекционного процесса

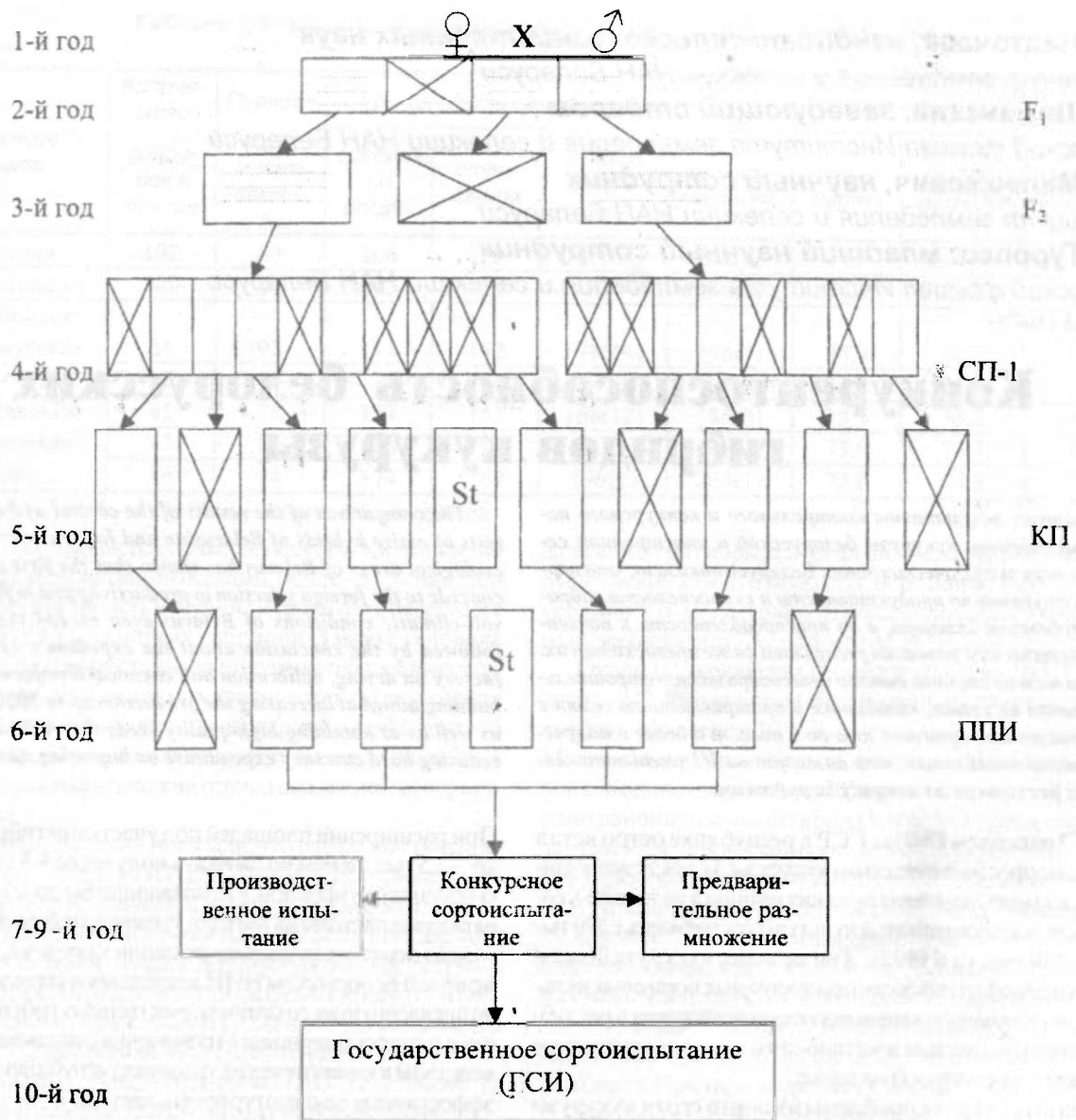


Рис. 2. Схема создания сортов высоколизинового ячменя

дет собрано 1,5 т семян, при урожайности 40 ц/га — 2 т и т. д. Полученных семян достаточно для ГСИ, закладки питомника ППР и для изучения сортовой агротехники (СА). Движение селекционного материала показано на рисунке 1.

По этой схеме образец в Госкомиссию попадает в 7-м поколении, или на 8-й год работы. В том случае, если есть необходимость селекционировать несколько образцов одновременно, то образцы не раскладываются на семьи, а отбор производится между образцами. Движение селекционного материала происходит по классической схеме (рис. 2), образец в Госкомиссию попадает на 10-й год работы, или в 9-м поколении. При этом упор делается на отбор лучшего среди образцов. По предлагаемой схеме (рис. 1) отбор лучшего заканчивается в 3-м (иногда в 4-м) поколении, а в последующие этапы происходит использование максимального коэффициента размножения и проводится негативный отбор в пределах образца. По предлагаемой технологии существенно сокращается объем работы. Она

особенно эффективна в случаях, когда селекционируется только один признак (например, масса зерна) или когда необходимо ценный образец как можно скорее довести до производства.

### Литература

1. Мунк Л. Генетические основы улучшения белка у зерновых. Генетика и благосостояние человечества. Москва: Наука, 1981. — С. 426-433.
2. Я.Лекеш, И.Бареш, А.Трофимовская. Международный классификатор СЭВ рода *Hordeum* L. — Ленинград: ВИР, 1983. — С. 52.
3. Гриб О. М., Павлович Л. М. Генетический контроль морфологического признака "остистость" у ячменя // Вестн ААН РБ. — 2000. — № 3. — С. 61-65.
4. Павлович Л. М., Дружина Ю. А., Гриб О. М. Изменение признаков и свойств ярового ячменя в процессе сортоотбора // Вестн ААН РБ. — 1999. — № 2. — С. 28-32.