

АГРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ (*Triticum aestivum* L.) ПРИ ОБРАБОТКЕ СЕМЯН ХИМИЧЕСКИМ МУТАГЕНОМ ФОСФЕМИДОМ

Н.А. БОМЕ¹, Л.И. ВАЙСФЕЛЬД², Е.В. БАБАЕВ³, А.Я. БОМЕ⁴,
Н.Н. КОЛОКОЛОВА¹

Метод химического мутагенеза позволяет в относительно короткие сроки получить материал с новыми признаками и свойствами, в том числе совершенно новые мутации. Эффективность применения метода для создания селекционно ценных форм растений в различных почвенно-климатических условиях показана в работах ряда авторов. Целью настоящей работы было изучение влияния мутагена фосфемиды в разной концентрации на агробиологические признаки гибридной формы и исходных сортов яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Исходный материал был представлен пятью сортами отечественной (Скэнт 1, Скэнт 3, var. *lutescens*) и иностранной (Сага, var. *erythrospermum*; Hybrid, var. *ferrugineum*; Лютесценс 70, var. *lutescens*) селекции. Предварительное изучение сортов проводили в 2006–2008 годах. В 2009 году с использованием неполных диаллельных скрещиваний и принудительного опыления были получены гибридные комбинации с участием названных сортов. На двух сортах (Сага и Скэнт 3) и гибридной форме F₄ (Сага × Скэнт 3) изучали эффективность применения химического мутагена фосфемиды в концентрациях 0,002 и 0,01 %. Обработку проводили, помещая семена в растворы фосфемиды в течение 3 ч. Контролем служили семена, выдержанные в дистиллированной воде. В лабораторных условиях определяли энергию прорастания семян и оценивали морфометрические параметры проростков, рассчитывали индексы ингибирования роста. В полевых условиях выращивали поколение M₁. Весной 2014 года высевали по 25 семян в 4-кратной повторности отдельно для каждого варианта обработки мутагеном. Индивидуально от каждого растения M₁ получали потомство M₂. Устойчивость образцов к листовым грибным болезням (мучнистая роса, листовая ржавчина и пятнистости) оценивали на естественном инфекционном фоне в течение всего вегетационного периода (с появлением первых симптомов заболевания до усыхания листьев). Патоген идентифицировали в лабораторных условиях. Полученные результаты позволяют предположить, что применение фосфемиды способствует расширению разнообразия исходного материала. В первом поколении (M₁) наблюдался ингибирующий эффект фосфемиды в отношении полевой всхожести семян и морфометрических параметров проростков (длина корней и побега), который зависел от концентрации мутагена. Наименьшую толерантность к действию фосфемиды проростки проявили по числу зародышевых корней. Эффект стимуляции по сравнению с контролем наблюдался у гибридной комбинации Сага × Скэнт 3 по показателям энергии прорастания семян (на 5,9 %) в лабораторном опыте и биологической устойчивости растений в полевых условиях в течение вегетационного периода (на 14,0–80,0 %). Под влиянием мутагена происходило достоверное увеличение массы зерна с 1 м² у гибрида (на 16,0 %) и снижение этого показателя у селекционных сортов Сага и Скэнт 3 (соответственно на 67,0 и 57,0 %). Высокая концентрация мутагена (0,01 %) снижала устойчивость сортов к мучнистой росе и бурой ржавчине. У гибридной формы восприимчивость к мучнистой росе уменьшалась, к бурой ржавчине — повышалась. В M₂ оценивали фенотипические изменения по морфологическим признакам колоса, стебля, листьев (окраска, опушение, форма, размеры) и по биологическим свойствам (позднеспелые, раннеспелые, растения озимого типа); всего описано 12 типов. Растения с крупным колосом, прочной соломиной, низкорослые и карлики чаще встречались у гибрида (13,6–20,0 % от общего числа измененных форм). У исходных сортов в значительном количестве были обнаружены раннеспелые растения (16,4–24,2 %). Доля семей с измененными растениями у сортов была на 5,3 % меньше, чем у гибрида. Максимальное число изменений у сортов и гибрида обнаружено в вариантах с концентрацией мутагена 0,01 %. Таким образом, на сортах и внутривидовом гибриде яровой мягкой пшеницы показана эффективность применения мутагена фосфемиды в концентрациях 0,002 и 0,01 % для получения форм с улучшенными признаками.

Ключевые слова: яровая пшеница, химический мутагенез, трансгрессия, фитопатогены, мутации.

Основу продовольственной и биоресурсной безопасности составляют генетические ресурсы растений. К середине XXI века может быть утрачено до 60 % их видового состава (1, 2). Потери растительных ресурсов рассматриваются как один из факторов экологического кризиса биосферы (3), поэтому необходима стратегия сохранения и устойчивого ис-

пользования биоразнообразия, предполагающая в том числе его расширение с помощью классических и современных методов.

Традиционный метод химического мутагенеза позволяет в относительно короткие сроки получить организмы с новыми признаками и свойствами (4). Он широко и эффективно применялся и применяется при создании селекционно ценных форм растений в различных почвенно-климатических условиях, в том числе в Западной Сибири (5-8). Развитие мутационной селекции может быть связано с применением известных химических супермутагенов (N-нитрозометилмочевина, N-нитрозоэтилмочевина, этиленимин), а также с открытием новых высокоактивных веществ (9). К ним относят хиральные стереоизомеры, используемые при производстве гербицидов, инсектицидов, фунгицидов (10). Мутагенным эффектом также обладают алкилирующие агенты, азотистая кислота, оксид азот, аналоги азотистых оснований и родственные им соединения, антибиотики, интеркалирующие агенты, топоизомеразы ядов (11).

В состав диэтиленимид-2-амидопиримидилфосфорной кислоты (фосфазин, суп. фосфемид — *phospemidum*) входят две группы этиленимина, соединенные с фосфором, и пиримидиновое основание. Этиленимин вызывает мутации, пиримидиновое основание включается в хромосому во время синтеза ДНК, определяя специфичность эффекта. Мутагенный эффект фосфемиды (12) изучен нами ранее на модельном объекте *Crepis capillaris* L. (скерда волосовидная). На *Triticum aestivum* L. подобных исследований не проводили. Необходимый рабочий этап в экспериментальном мутагенезе — определение диапазонов концентраций, в которых возможно проявление нужных эффектов.

В настоящей работе впервые исследована специфичность мутагенного эффекта фосфемиды на сортах (Сага и Скэнт 3) и гибридной форме яровой мягкой пшеницы и определено действие химического мутагена на изменчивость популяционных и индивидуальных признаков.

Нашей целью было изучение влияния фосфемиды в разной концентрации на агробиологические признаки яровой мягкой пшеницы.

Методика. Исходный материал яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) был представлен пятью сортами из мировой коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР): отечественной селекции — Скэнт 1 и Скэнт 3 (var. *lutescens*, Россия, Тюменская обл.), иностранной селекции — Сага (var. *erythrospermum*, Мексика), Hybrid (var. *ferrugineum*, Мексика), Лютесценс 70 (var. *lutescens*, Казахстан). Предварительное изучение сортов проводили в 2006-2008 годах (Тюменский опорный пункт ВИР) (13). В 2009 году с использованием неполных диаллельных скрещиваний и принудительного опыления (14) были получены гибридные комбинации с участием названных сортов.

Сравнительную оценку гибридных и родительских форм в полевых условиях выполняли в 2010-2014 годах при посеве блоками с площадью питания каждого растения 10×20 см на первом этапе (F₁) и при посеве семьями (потомство одного растения) — на последующих этапах (F₂, F₃ и др.). По каждой гибридной комбинации в F₁ было проанализировано свыше 50, в F₂ и последующих поколениях — 200 растений и более.

Эффективность химического мутагена фосфемиды в концентрациях 0,002 и 0,01 % изучали на двух сортах (Сага и Скэнт 3) и гибридной форме F₄ (Сага × Скэнт 3). Обработку проводили, помещая семена в растворы фосфемиды на 3 ч; контролем служили семена, выдержанные в дистиллированной воде. Использовали по 300 семян каждого сорта и гибридной комбинации (по 100 в каждом варианте опыта — контроль,

0,002 % мутагена, 0,01 % мутагена) для лабораторных и по 300 семян для полевых исследований.

В лабораторных условиях определяли энергию прорастания семян и оценивали морфометрические параметры проростков (15). Индексы ингибирования роста рассчитывали как соотношение длины корней, побегов и числа корней проростков при действии мутагена и в контроле.

Поклоение M_1 в полевых условиях получали на экспериментальном участке биостанции «Озеро Кучак» (Нижнетавдинский р-н, Тюменская обл.) Тюменского государственного университета (ТюмГУ). Весной 2014 года высевали по 25 семян в 4-кратной повторности отдельно для каждого варианта обработки мутагеном. Индивидуально от каждого растения M_1 получали потомство M_2 . Устойчивость образцов к листовым грибным болезням (мучнистая роса, листовая ржавчина и пятнистости) оценивали на естественном инфекционном фоне в течение всего вегетационного периода (с появления первых симптомов заболевания до усыхания листьев) (16). Патоген идентифицировали в лабораторных условиях с помощью микроскопической техники и влажной камеры (17). В M_2 оценивали фенотипические изменения по морфологическим признакам колоса, стебля, листьев (окраска, опушение, форма, размеры) и по биологическим свойствам (позднеспелые, раннеспелые, растения озимого типа).

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием табличного процессора Microsoft Excel и программного обеспечения STATISTICA 6.0 («StatSoft Inc.», США). Для количественных признаков в таблицах представлены средние значения ($X_{cp.}$) и ошибка среднего (S_x), для качественных — значение (X) и показатель изменчивости признака (S). Рассчитана достоверность различий между средними значениями вариантов с использованием t -критерия Стьюдента.

Результаты. Сорт Cara относился к группе низкорослых (высота растений 54,9 см), был устойчив к полеганию (7-9 баллов). Продолжительность его вегетационного периода составляла 77 сут, как и у сорта Hybrid, но была на 5-6 сут меньше, чем у сортов Скэнт 1, Скэнт 3 и Лютесценс 70. Сорт устойчив к поражению мучнистой росой и, по данным GRIS (Genetic Resources Information System for Wheat and Triticale), несет ген устойчивости к ржавчине *Lr13* в устойчивом аллельном состоянии. Сорт Hybrid проявил высокие адаптивные свойства в крайне неблагоприятных метеорологических условиях 2008 года. В период прорастания семян и формирования всходов количество осадков составило 68,6 % от нормы, а среднесуточная температура воздуха была на 0,5 °C выше средних многолетних значений, отмечался активный вылет шведской мухи. Сорт характеризовался высокой засухоустойчивостью (7 баллов) и средней устойчивостью к повреждению вредителем (5 баллов). Сорта Скэнт 1, Скэнт 3 и Лютесценс 70 включены в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию по 10-му Западно-Сибирскому региону России. Сорта среднеспелые (82-83 сут), с высокой полевой всхожестью семян и продуктивной кустистостью, а также умеренной восприимчивостью к болезням.

На основании результатов изучения 10 комбинаций внутривидовых скрещиваний (F_1 - F_4) по показателям комбинационной способности, характеру взаимодействия генов, степени доминирования в первом поколении (F_1), трансгрессии и наследуемости во втором поколении (F_2) была отобрана гибридная форма Cara \times Скэнт 3. Ее высокие продуктивные свойства подтвердились при экологическом испытании гибридов F_4 и F_5 в трех географических пунктах: экспериментальный участок биостанции «Озе-

ро Кучак» (ТюмГУ, Тюменская обл., Россия), Земля Баден-Вюртемберг (экспериментальный участок Вальдорфской школы, Германия), Земля Нижняя Саксония (опытная станция «Waldhof», Германия), существенно различающихся по природно-климатическим условиям.

Лучшая линия из гибридной комбинации Сага × Скэнт 3 по биологической урожайности за 2013-2014 годы превосходила стандарты: в Тюменской области — сорта Новосибирская 15 и Иргина на 62,2 %, в Баден-Вюртемберге — Ashby и Scirocco на 44,1 %; в Нижней Саксонии преимущественно относительно сортов Eminent и Granus не проявились (18). Гибрид характеризовался высокой устойчивостью к пятнистостям (возбудители *Alternaria* spp. и *Helminthosporium* spp.) и бурой ржавчине [*P. recondita* Rob. ex. Desm f. sp. *tritici* Eriks. (= *P. triticina* Eriks.)].

Для расширения биоразнообразия исходного материала *T. aestivum* L. рассматривали возможность использования рекомбинационной и мутационной изменчивости. Одним из основных критериев успешного применения мутагена фосфемиды служила доля измененных растений. В целом было проанализировано 1238 семей M_2 по двум сортам Сага и Скэнт 3 и 636 семей гибрида Сага × Скэнт 3 (табл. 1).

1. Эффективность применения мутагена фосфемиды в разных концентрациях на яровой мягкой пшенице (*Triticum aestivum* L.), оцененная в поколении M_2 ($\bar{X}_{cp} \pm S_x$, биостанция ТюмГУ «Озеро Кучак», Нижнетавдинский р-н, Тюменская обл., 2014 год; полевой опыт)

Концентрация фосфемиды, %	Сорта Сага и Скэнт 3, семей			Гибрид, семей		
	всего, шт.		доля измененных, %	всего, шт.		доля измененных, %
	проанализировано	с изменениями		проанализировано	с изменениями	
Контроль	329	12	3,6±1,03	120	9	7,5±2,40
0,002	550	72	13,1±1,44	272	27	9,9±3,28
0,01	359	64	17,8±4,08	244	74	30,3±2,95

Генотипические особенности сортов и гибрида по относительному выходу селекционно ценных форм можно было установить на основании их реакции на разные дозы мутагена. В наших опытах наибольшее число измененных растений как у сортов, так и у гибрида было обнаружено при концентрации мутагена 0,01 %.

Гибрид существенно отличался от селекционных сортов по спонтанной мутационной изменчивости. При изучении популяций сортов было обнаружено 3,6 % изменений, тогда как среди гибридных семей — в 2 раза больше (7,2 %).

Фенотипические изменения в вариантах с применением химического мутагена оказались достаточно разнообразными. В M_2 были выделены следующие селекционно значимые типы: высокорослые, низкорослые, карлики, крупноколосые, растения озимого типа, позднеспелые, раннеспелые, с широким флаговым листом, с измененной формой и окраской колоса (спельтоидный, пирамидальный, желтый), с прочной соломиной. У гибридной формы наблюдалось 8 типов изменений из 12 обнаруженных. Наибольшую частоту появления измененных форм при воздействии раствора фосфемиды в концентрации 0,01 % выявили у гибрида (30,33 %), при 0,002 % — у сорта Сага (15,31 %). Чаще регистрировали растения с крупным колосом, ранними или поздними сроками созревания, высокорослые, значительно реже — с измененной формой колоса. У гибрида преимущественно встречались крупноколосые формы (длина колоса 16,5-21,8 см) — 20,0 %; высокорослые (89,3-103,5 см) — 18,2 %; с прочной соломиной (устойчивость к полеганию 9 баллов) — 13,6 %; низкорослые и кар-

лики (39,8-61,2 см) — 16,4 %. Раннеспелые формы (созревание на 3-5 сут раньше, чем в контроле) в большем количестве появлялись у сортов Сага и Скэнт 3 — соответственно 24,2 и 12,3 %. Спельтоидный колос обнаружили на 5 растениях М₂, выращенных из семян, обработанных фосфемидом в концентрации 0,01 % и проверенных в М₃. Несмотря на то, что эти мутации доминантные и полудоминантные, в М₁ мы их не выявили. Зерно в колосьях спельтоидного типа характеризуется повышенным содержанием белка (19), подробно изучена цитогенетика спельтоидов у мутантов (20). Наблюдаемые различия по частоте и разнообразию измененных форм у гибрида и исходных сортов могут быть связаны с их чувствительностью к мутагену.

2. Морфометрические показатели у проростков яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в поколении М₁ при обработке семян фосфемидом в разных концентрациях (лабораторный опыт)

Концентрация фосфемиды, %	Образец	Число зародышевых корней		Длина побега		Длина корней	
		$\bar{X}_{cp} \pm S_{\bar{X}}$, шт.	ИЧК	$\bar{X}_{cp} \pm S_{\bar{X}}$, мм	ИДП	$\bar{X}_{cp} \pm S_{\bar{X}}$, мм	ИДК
Контроль	Сага	2,84±0,12	1,00	8,21±0,78	1,00	21,42±1,09	1,00
	Сага × Скэнт 3	3,82±0,32	1,00	11,35±0,80	1,00	20,09±1,40	1,00
	Скэнт 3	3,82±0,21	1,00	9,18±0,85	1,00	13,19±0,99	1,00
0,002	Сага	2,80±0,12	0,99	3,22±0,13**	0,39	12,95±0,87**	0,60
	Сага × Скэнт 3	3,56±0,22	0,93	11,17±1,34	0,98	15,07±1,41*	0,75
	Скэнт 3	3,64±0,27	0,95	8,56±1,00	0,93	12,57±1,24	0,95
0,01	Сага	2,81±0,14	0,99	4,83±0,21**	0,59	8,75±0,63**	0,41
	Сага × Скэнт 3	3,25±0,31	0,85	6,44±1,42	0,57	11,69±1,81**	0,58
	Скэнт 3	1,80±0,37**	0,47	4,80±0,77**	0,52	8,44±2,56*	0,64

Примечание. ИЧК — индекс числа корней, ИДП — индекс длины побега; ИДК — индекс длины корней.

* и ** Различия с контролем статистически значимы соответственно при $P < 0,05$ и $P < 0,01$.

В лабораторном опыте для дифференциации сортов и гибрида по реакции на воздействие мутагена были исследованы средние значения признака и индексы ингибирования роста корней и побегов у проростков. Описание индексов как критерия реакции растений на стрессоры (низкие температуры, ионы алюминия, фториды, нитраты свинца, нефтяное загрязнение и др.) приводится в работах ряда авторов (21-23). В нашем опыте проростки яровой пшеницы проявили толерантность к действию фосфемиды по числу зародышевых корней (табл. 2). Достоверные отличия от контроля по этому признаку были обнаружены только у сорта Скэнт 3 (0,01 %). Значение индекса числа корней в этом варианте составило 0,47, в других вариантах с мутагеном — 0,85-0,99.

Самый сильный токсический эффект в отношении первичной корневой системы проявился у фосфемиды в концентрации 0,01 %, при этом максимальной чувствительностью к мутагену характеризовался сорт Сага (ИДК = 0,41). У этого же сорта при низкой концентрации мутагена (0,002 %) отмечали уменьшение длины побега на 61,0 %, при 0,01 % — на 41,0 %. У сорта Скэнт 3 и гибрида Сага × Скэнт 3 более высокий токсический эффект наблюдался при концентрации мутагена 0,01 %. Стимулирования роста корней и побегов при воздействии фосфемиды не обнаружили. Наибольшее угнетение ростовых процессов у исходных сортов и гибрида отмечали при концентрации мутагена 0,01 %.

Критериями оценки посевных качеств семян служили энергия прорастания в лабораторном эксперименте и полевая всхожесть. Мутаген в концентрации 0,002 % оказал стимулирующее влияние на скорость прорастания семян у гибридной формы, что способствовало увеличению энергии прорастания Сага на 5,9 % по сравнению с таковой у лучшего родительского сорта (табл. 3).

3. Чувствительность (относительно контроля, %) к обработке семян разными концентрациями фосфемидом у родительских сортов и гибридной (F₄) формы яровой мягкой пшеницы в поколении M₁ (*Triticum aestivum* L.) (биостанция ТюмГУ «Озеро Кучак», Нижнетавдинский р-н, Тюменская обл., 2013 год; лабораторный и полевой опыты)

Концентрация фосфемидом, %	Образец	Энергия прорастания семян	Полевая всхожесть семян	Биологическая устойчивость
0,01	Сага	75,0*	37,0*	27,0*
	Сага × Скэнт 3	47,1*	90,0	180,0*
	Скэнт 3	52,9*	64,9*	54,6*
0,002	Сага	100,0	97,0	90,0*
	Сага × Скэнт 3	105,9*	67,0*	114,0*
	Скэнт 3	94,1*	82,4*	82,5*

* Различия с контролем (семена, выдержанные в дистиллированной воде) статистически значимы при P < 0,05.

В полевых условиях контрольные семена сортов и гибрида характеризовались высокой всхожестью (97-100 %). Во всех вариантах с фосфемидом отмечали снижение этого показателя, что может быть связано с нарушением ростовых процессов в зародыше. Сорт Сага показал высокую чувствительность к мутагену при концентрации 0,01 %. Биологическая устойчивость растений в этом варианте, рассчитанная как отношение числа растений, сохранившихся к уборке, к числу высеванных семян, была очень низкой (27,0 %). У гибридной формы, в отличие от исходных сортов, токсическое воздействие высокой концентрации по показателю полевой всхожести семян проявилось менее значительно, а по биологической устойчивости наблюдался эффект стимуляции. Повышенная резистентность гибрида F₄ к химическому мутагену могла быть обусловлена гетерозиготностью, связанной с гибридным происхождением или индуцированной фосфемидом.

Выраженность количественных признаков, по мнению ряда авторов (24-27), зависит от продолжительности вегетационного периода, высоты растений, устойчивости к полеганию и чувствительности фотосинтетического аппарата к неблагоприятным факторам окружающей среды. Результатом сложного взаимодействия генотипа с условиями среды становится урожайность (28-30).

Выявлена неоднозначная реакция растений на воздействие мутагена по семенной продуктивности в M₁. У гибрида Сага × Скэнт 3 при обработке семян фосфемидом в концентрации 0,01 % стимулирующий эффект проявился в статистически достоверном увеличении массы зерна с 1 м² на 16,0 % по сравнению с контролем, у сортов Сага и Скэнт 3 отмечалось существенное снижение семенной продуктивности — соответственно на 67,0 % и 57,0 %. Гибрид, характеризующийся большей устойчивостью к химическому мутагену по выживаемости растений, имел и более высокие показатели по массе зерна в сравнении с исходными формами.

Родительские и гибридная формы существенно различались по распространенности (P) грибных болезней на естественном инфекционном фоне. В 2013 году у растений пшеницы не было обнаружено пораженный листьев возбудителями мучнистой росы *Erysiphe graminis* DC. и бурой ржавчины *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici* Eriks. (= *P. triticina* Eriks.). Распространенность поражения мучнистой росой достигла максимума (100 %) в 2014 году.

Наибольшую активность пятнистостей (возбудители *Alternaria* spp. и *Helminthosporium* spp.) регистрировали в 2013 году (P = 2-50 %). При этом у гибрида Сага × Скэнт 3, обработанного фосфемидом в концентрации 0,01 %, отмечали их наименьшую распространенность (табл. 4).

4. Устойчивость исходных сортов и гибридной (F₄) формы яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в поколениях M₁ и M₂ к основным фитопатогенным грибам при обработке семян фосфемидом в разных концентрациях (биостанция ТюмГУ «Озеро Кучак», Нижнетавдинский р-н, Тюменская обл., 2013-2014 годы; полевой опыт)

Образец	Концентрация фосфемиды, %	Мучнистая роса		Бурая ржавчина		Пятнистости	
		Р, %	У	Р, %	У	Р, %	У
M ₁ (2013 год)							
Сага	Контроль	0	—	0	—	30	Очень высокая
	0,002	0	—	0	—	5	Очень высокая
	0,01	0	—	0	—	10	Высокая
Сага × Скэнт 3	Контроль	0	—	0	—	40	Высокая
	0,002	0	—	0	—	40	Очень высокая
	0,01	0	—	0	—	2	Очень высокая
Скэнт 3	Контроль	0	—	0	—	40	Высокая
	0,002	0	—	0	—	30	Высокая
	0,01	0	—	0	—	50	Высокая
M ₂ (2014 год)							
Сага	Контроль	100	Высокая	50	Очень высокая	30	Очень высокая
	0,002	100	Высокая	50	Очень высокая	30	Очень высокая
	0,01	100	Низкая	100	Низкая	5	Очень высокая
Сага × Скэнт 3	Контроль	100	Средняя	100	Очень высокая	5	Очень высокая
	0,002	100	Низкая	50	Очень высокая	10	Очень высокая
	0,01	100	Высокая	100	Низкая	3	Очень высокая
Скэнт 3	Контроль	100	Средняя	100	Низкая	5	Очень высокая
	0,002	100	Средняя	100	Низкая	5	Очень высокая
	0,01	100	Низкая	100	Низкая	10	Очень высокая

Примечание. Р — распространенность (встречаемость болезни); У — устойчивость к заболеванию; прочерк означает отсутствие заболевания.

Полное представление об устойчивости растений к листовым фитопатогенам можно получить при определении степени поражения и индекса развития болезни (R), рассчитанном на основе учета больных и здоровых растений и балла поражения. По индексу развития выделяли четыре группы устойчивости: очень высокая (R = 0-20 %), высокая (R = 21-40 %), средняя (R = 41-60 %), низкая (R = 61-80 %). У исходных сортов в M₂ наблюдалось снижение устойчивости растений к возбудителям мучнистой росы и бурой ржавчины от высокой и средней в контроле до низкой в варианте с концентрацией мутагена 0,01 %; под влиянием высокой концентрации фосфемиды восприимчивость гибрида к мучнистой росе снижалась, к бурой ржавчине — повышалась. К пятнистостям растения в контроле и после применения фосфемиды проявили высокую и очень высокую устойчивость (см. табл. 4).

Обобщение результатов лабораторных и полевых экспериментов показало, что по количеству и разнообразию получаемых измененных форм мутагенная активность фосфемиды сходна с таковой у супермутагенов нитрозоэтилмочевины и диметилсульфата в концентрациях 0,01; 0,02; 0,03 и 0,05 % (изучена нами ранее на трех сортах озимой пшеницы из Швеции — Truggve, WW 5530, WW 6110) (8). Полученные данные позволяют предположить, что фосфемид может использоваться в мутационной селекции яровой мягкой пшеницы. В целом значение метода экспериментального мутагенеза для расширения генетического разнообразия растений подтверждено созданием в мире свыше 3000 сортов разных культур (31).

Таким образом, на сортах и внутривидовом гибриде яровой мягкой пшеницы показана эффективность применения мутагена фосфемиды в концентрациях 0,002 и 0,01 % для получения форм с измененными признаками. При обработке семян фосфемидом был отмечен жесткий ингибирующий эффект в отношении всхожести и морфометрических параметров у проростков, который зависел от дозы мутагена. Увеличивалась жизнеспособность растений в период вегетации. Гибридная форма Сага × Скэнт 3

имела преимущество перед исходными сортами по семенной продуктивности. В варианте с обработкой мутагеном концентрацией 0,01 % у нее повышалась устойчивость к поражению мучнистой росой. Гибрид характеризовался меньшей чувствительностью к мутагену в M_1 и большей частотой и разнообразием измененных форм в M_2 по сравнению с исходными сортами. Не выявлено четкой зависимости между восприимчивостью сортов и гибрида к фитопатогенным грибам и концентрацией фосфемиды. Различия в реакции сортов и гибридной формы на воздействие мутагенного фактора обусловлены генотипическими особенностями исходных сортов, а также степенью гетерозиса и гетерозиготности гибрида. Положительным следствием этого может быть высокая адаптивность, обеспечивающая повышенную приспособленность к неблагоприятным условиям окружающей среды у создаваемых сортов пшеницы.

Авторы выражают благодарность доктору биологических наук Н.А. Проворову (ВНИИСХМ, г. Санкт-Петербург) за анализ статьи и дискуссии по отдельным вопросам метода экспериментального мутагенеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексанян С.М. Стратегия взаимодействия генбанков мира в условиях глобализации. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 2007, 164: 11-33.
2. Современные методы и международный опыт сохранения генофонда дикорастущих растений (на примере диких плодовых). Коллективная монография. Алматы, 2011.
3. Конвенция о биологическом разнообразии. Режим доступа: <https://www.cbd.int/undb/media/factsheets/undb-factsheets-ru-web.pdf>. Дата обращения: 1.06. 2016.
4. Рапопорт И.А. Микрогенетика. Репринтное издание. М., 2010.
5. Поползухина Н.А. Селекция яровой мягкой пшеницы в условиях Западной Сибири на основе сочетания индуцированного мутагенеза и гибридизации. Автореф. докт. дис. Тюмень, 2004.
6. Кротова Л.А. Химические мутагены как фактор получения различных мутаций у яровой мягкой пшеницы. Вестник Алтайского государственного университета, 2009, 9: 12-15.
7. Боме Н.А., Боме А.Я. Мутационная изменчивость некоторых видов растений и репарационный эффект пара-аминобензойной кислоты. В сб.: Индукований мутагенез в селекції рослин. Біла Церква, 2012: 53-60.
8. Боме Н.А. Реакция образцов озимой мягкой пшеницы в M_1 на обработку семян химическими мутагенами. Естественные и технические науки, 2014, 11-12(78): 126-129.
9. Моргун В.В., Катеринчук А.М., Чугункова Т.В. Использование новых стереоизомеров нитрозоалкилмочевины в селекции озимой пшеницы. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2013, 15(3/5): 1666-1669.
10. Meng Q., Redetzke D.L., Hackfeld L.C., Hodge R.P., Walker D.M., Walker V.E. Mutagenicity of stereochemical configurations of 1,2-epoxybutane and 1,2:3,4-diepoxybutane in human lymphoblastoid cells. Chem.-Biol. Interact., 2007, 166(1-3): 207-218 (doi: 10.1016/j.cbi.2006.06.001).
11. Plant mutation breeding and biotechnology /Q.Y. Shu, B.P. Forster, H. Nakagawa (eds.). Plant Breeding and Genetics Section, Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2012 (doi: 10.1079/9781780640853.0000).
12. Weisfeld L.I. About cytogenetic mechanism of chemical mutagenesis. In: Ecological consequences of increasing crop productivity. Plant breeding and biotic diversity /A.I. Opalko, L.I. Weisfeld, S.A. Bekuzarova, N.A. Bome, G.E. Zaikov (eds.). Toronto-New Jersey, Apple Academic Press, 2015: 259-269.
13. Градчанинова О.Д., Филатенко А.А., Руденко М.Н. Методические указания по изучению мировой коллекции пшеницы. Л., 1987.
14. Дорофеев В.Ф., Лаптев Ю.П., Чекалин Н.М. Цветение, опыление и гибридизация растений. М., 1990.
15. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М., 2011.
16. Гриценко В.В., Орехов Д.А., Попов С.Я., Стройков Ю.М., Третьяков Н.Н., Шкаликов В.А. Защита растений. М., 2005.
17. Попкова К.В., Шкаликов В.А., Стройков Ю.М., Лекомцева С.Н., Скворцова И.Н. Общая фитопатология. М., 2005.

18. Боме Н.А., Рипбергер Е.И., Траутц Д. Изменчивость признаков продуктивности колоса гибридных форм *Triticum aestivum* L. как способ адаптации в различных эколого-географических условиях. Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование, 2015, 1(1): 98-107.
19. Гринвальд К. Таксономические мутации, индуцированные у *Tr. aestivum* L. В сб.: Экспериментальный мутагенез в селекции. М., 1972: 333-347.
20. Мас Кей I. Mutation breeding in polyploid cereals. Acta Agr. Scand., 1954, 3(4): 543-555.
21. Гришко В.Н. Оценка токсического действия фторидов на сельскохозяйственные растения. Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія, 2008, 16(1): 64-67.
22. Карманенко Н.М. Сортовая реакция зерновых культур на низкие температуры, условия закисления и ионы алюминия. Сельскохозяйственная биология, 2014, 5: 66-77 (doi: 10.15389/agrobiology.2014.5.66rus).
23. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Влияние нитрата свинца на морфологические и цитогенетические показатели растений ярового двузрядного ячменя (*Hordeum vulgare* L.). Агрехимия, 2014; 7: 45-52.
24. Mathews K.L., Chapman S.C., Trethowan R., Singh R.P., Crossa J., Pfeiffer W., van Ginkel M., DeLacy I. Global adaptation of spring bread and durum wheat lines near-isogenic for major reduced height genes. Crop Sci., 2006, 46(2): 603-613 (doi: 10.2135/cropsci2005.05-0056).
25. Marias R.R., Goncalves J.F.C., Santos Jr. U.M., Dünisch O., Santos A.L.W. Chloroplastid pigment contents and chlorophyll a fluorescence in Amazonian tropical three species. Revista Arvore, 2007, 31(5): 959-966 (doi: 10.1590/S0100-67622007000500020).
26. Malchikov P.N., Myasnikova M.G. Approaches to the development of durum wheat cultivars (*Triticum durum* Desf.) with a wide variability of the growth season. Russian Journal of Genetics: Applied Research, 2016, 6(3): 249-257 (doi: 10.1134/S2079059716030072).
27. Ripberger E.I., Bome N.A., Trautz D. Variation in the plant height of spring common wheat (*Triticum aestivum* L.) hybrid forms under different ecological and geographical conditions. Russian Journal of Genetics: Applied Research, 2016, 3(6): 258-263 (doi: 10.1134/S2079059716030102).
28. Gaju O., Reynolds M.P., Sparces D.L., Foulkes M.E. Relationships between large-spike phenotype, grain number, and yield potential in spring wheat. Crop Sci., 2009, 49(3): 961-973 (doi: 10.2135/cropsci2008.05.0285).
29. Knezevic D., Zecevic V., Stamenkovic S., Milosevic B. Variability of number of kernels per spike in wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). Journal of Central European Agriculture, 2012, 13(3): 608-614 (doi: 10.5513/JCEA01/13.3.1099).
30. Protich R., Nodorovich G., Protich N. Grain weight per spike of wheat using different ways of seed protection. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2012, 18(2): 185-190.
31. Nuclear safety review for the year 2009. IAEA, Austria. Режим доступа: https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/GC54InfDocuments/English/gc54inf-2_en.pdf. Дата обращения: 20.06.2017.

*¹ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет,
625003 Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 6,
e-mail: bomena@mail.ru;*

Поступила в редакцию
24 октября 2016 года

*²ФГБУН Институт биохимической физики
*им. Н.М. Эмануэля РАН,**

119334 Россия, г. Москва, ул. Косыгина, 4,
e-mail: liv11@yandex.ru;

*³ФГБОУ ВО Московский государственный
*университет им. М.В. Ломоносова,**

119991 Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1,
e-mail: babaev@org.chem.msu.ru;

⁴ФГБНУ ФИЦ Всероссийский институт

генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова,

190000 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42,
e-mail: genbank.d@gmail.com

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2017, V. 52, № 3, pp. 570-579

INFLUENCE OF PHOSPHOMIDE, A CHEMICAL MUTAGEN, ON AGROBIOLOGICAL SIGNS OF SOFT SPRING WHEAT *Triticum aestivum* L.

N.A. Bome¹, L.I. Weisfeld², E.V. Babaev³, A.Ya. Bome⁴, N.N. Kolokolova¹

¹Tyumen State University, 6, ul. Volodarskogo, Tyumen, 625003 Russia, e-mail bomena@mail.ru (corresponding author);

²N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics RAS, Federal Agency of Scientific Organizations, 4, ul. Kosygina, Moscow, 119334 Russia, e-mail liv11@yandex.ru;

³M.V. Lomonosov Moscow State University, Biological Faculty, 1, Leninskie gory, Moscow, 119991 Russia, e-mail babaev@org.chem.msu.ru;

⁴Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Federal Agency of Scientific Organizations, 42, ul. Bol'shaya Morskaya, St. Petersburg, 190000 Russia, e-mail genbank.d@gmail.com

ORCID:

Bome N.A. orcid.org/0000-0002-8496-5365

Bome A.Ya. orcid.org/0000-0001-6999-8997

Weisfeld L.I. orcid.org/0000-0002-8449-3679

Kokolova N.N. orcid.org/0000-0002-6833-6462

Babaev E.V. orcid.org/0000-0001-8727-7763

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

The authors thank Dr N.A. Provorov (ARRIAM, St. Petersburg) for the analysis of the article and helpful discussion on specific issues of experimental mutagenesis

Received October 24, 2016

doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.570eng

Abstract

The method of chemical mutagenesis allows in a relatively short time to obtain a material with new features and properties, including completely new mutations. The effectiveness of the application of the method for the creation of selection valuable forms of plants in various soil and climatic conditions is shown in the works of a number of authors. The purpose of this work was to study the effect of the mutagen namely phosphomid in different concentrations on the agrobiological characters at the hybrid form and the initial cultivars of spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.). Two domestic cultivars (Scant 1, Scant 3, var. *lutescens*) and three foreign cultivars (Cara, var. *erythrosperrum*; Hybrid, var. *ferrugineum*; Lutescens 70, var. *lutescens*) were the source material. A preliminary study of the varieties was carried out in 2006-2008. In 2009, hybrid combinations involving these varieties were obtained using incomplete diallel crosses and forced pollination. The efficacy of phosphomide, a chemical mutagen, at concentrations of 0.002 and 0.01 % was studied in two varieties (Cara and Scant 3) and F₄ hybrid (Cara × Scant 3). For the treatment, the seeds were soaked in phosphomide solutions for 3 hours, and the control seeds were soaked in distilled water. Germination energy and morphometric parameters of the seedlings were evaluated in laboratory tests to calculate the growth inhibition indices. In the spring 2014, 25 mutagen-treated seeds were sown in the field (Biostation of Tyumen State University, Tyumen Province) in 4-fold replication separately for each variant of treatment to obtain M₁ generation. From individual M₁ plants were separately derived M₂ generation. Resistance of the specimens toward leaf fungus diseases (powdery mildew, leaf rust and spotting) was assessed under natural infection development (Biostation of Tyumen State University, Tyumen Province) during the entire vegetation period, from appearance of the symptoms till the leaves dried up, using laboratory tests for specific pathogen identification. The results obtained suggest that the use of phosphomide promotes diversity of the breeding material. In the first generation (M₁), there was an inhibitory effect of phosphomide on field wheat germination and the morphometric parameters of seedlings (the length of roots and shoots) which depended on the mutagen concentration. The seedlings showed the least tolerance to phosphomide as to the number of germinal roots. The effect of stimulation compared to the control occurred in the hybrid combination Cara × Scant 3 as to seed germination energy indices (by 5.9 %) in the laboratory tests and plant viability in the field during the growing season (by 14.0-80.0 %). The mutagen increased significantly the grain weight per 1 m² in the hybrid (by 16.0 %) while the grain yield in the varieties Cara and Scant 3 decreased by 67.0 and 57.0 %, respectively. In high concentration (0.01 %) the mutagen reduced resistance to powdery mildew and brown rust in the varieties whereas in the hybrid at the same concentration the susceptibility to powdery mildew decreased, and to brown rust — increased. The phenotypic changes in M₂ were assessed according to the morphology of the ear, stem, leaves (color, pubescence, shape, size) and biological properties (late ripening, early ripening, winter type plants). In total, there were 12 types described. Plants with a large ear, strong stems, stunted and dwarfs were more common in the hybrid (13.6-20.0 % of the total number of modified forms). The varieties often produced early ripening forms (16.4-24.2 %). The proportion of families with altered plants in the varieties was 5.3 % less than in the hybrid. The highest rate of modifications in the varieties and the hybrid was influenced by 0.01 % concentration. Thus, it is shown that phosphomide at concentrations of 0.002 and 0.01 % is effective to improve agronomically important characteristics in the varieties and intraspecies hybrid of soft spring wheat.

Keywords: spring wheat, chemical mutagenesis, transgression, phytopathogens, mutants.

Научные собрания

THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ECOLOGICAL MODELLING GLOBAL CONFERENCE 2017

(17-21 September 2017, Ramada Plaza, Jeju, Korea)

General sessions: ecology in molecules and cells; individual ecology in relation with physiology, morphology, behavior, etc; population and community ecology; ecosystem functioning and management (e.g., energy, bio-geo-chemical cycle); food-energy-water nexus

Information: <https://www.elsevier.com/events/conferences/international-society-for-ecological-modelling-global-conference>