

УДК 633.11: 581.1.051

ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ СОРТОВ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ ПО АЛЮМОУСТОЙЧИВОСТИ

© 2014 г. Е.М. Лисицын^{1,2}, О.С. Амунова¹

¹ Государственное научное учреждение Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, Киров, Россия;

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», Киров, Россия,
e-mail: edaphic@mail.ru

Поступила в редакцию 7 июля 2014 г. Принята к публикации 11 августа 2014 г.

Яровая мягкая пшеница имеет широкий спектр генотипического разнообразия по реакции на стрессовое воздействие ионов алюминия. Среди исследованного набора отсутствуют неустойчивые сорта, среднеустойчивых сортов примерно 63 %, сортов с высокой устойчивостью – 25,5 %. Относительно чувствительных к алюминиевому воздействию сортов было 11,5 %. Независимо от региона происхождения образцы яровой мягкой пшеницы могут иметь разный уровень устойчивости к исследованному стрессовому эдафическому фактору. Изученный набор образцов пшеницы показал значительное генетическое разнообразие в проявлении реакции на стрессор со стороны хлоропластных пигментов. Структурно-функциональная перестройка пигментного аппарата листьев имеет сортоспецифический характер и не имеет тесной связи с уровнем алюмоустойчивости корневых систем. Проведенный кластерный анализ разделил всю совокупность сортов на 5 групп, имеющих разное сочетание параметров длины корней с мощностью их развития как в контроле, так и в присутствии алюминия. Авторы предполагают, что повышение алюмоустойчивости сортов яровой мягкой пшеницы происходит косвенным путем, параллельно с целенаправленной селекцией на повышение уровня устойчивости растений к абиотическим факторам среды выращивания.

Ключевые слова: пшеница, сорт, стресс, кластерный анализ, пигменты.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты агрохимического обследования почв по состоянию на 1 января 2011 г. показывают, что кислые почвы составляют 30,2 млн га, или 35,6 % пашни Российской Федерации (Доклад ..., 2011). Распределение кислых почв по европейской части Нечерноземной зоны России и их динамика подробно описаны нами ранее (Лисицын и др., 2012). Одним из путей решения проблемы использования кислых почв является эдафическая селекция, задача которой – получение генотипов, специфически приспособленных к неблагоприятным почвенным условиям (Баталова, Лисицын, 2002). Критическим параметром успешного создания устойчивых к стрессовым факторам сортов является изначальное гене-

тическое разнообразие растительных популяций по изучаемому показателю. По мнению В.А. Крупнова (2013), основным направлением селекции зерновых культур является устранение у лучших сортов и перспективных линий признаков, лимитирующих урожай и качество зерна. Вероятность успеха в создании нового сорта отбором из обширных гибридных популяций определяется удачным подбором реципиента и донора желательного признака.

С другой стороны, алюмоустойчивость, проявляющаяся на ранних этапах развития, является частью общей неспецифической устойчивости растений. Это предполагает наличие сопряженной устойчивости к действию разных типов стрессоров. Логично предположить, что устойчивость к алюминию может быть повыше-

на в ходе целенаправленной селекции к другим абиотическим стрессорам, имеющим место в зоне выведения сорта.

Мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.) является одной из основных продовольственных и фуражных культур мира, под посевами которой занято 216 млн га. Исследование генетического разнообразия сортов пшеницы может дать существенную информацию относительно ее потенциала в селекционных целях (Sofalian *et al.*, 2009). В России основными регионами возделывания яровой пшеницы являются Поволжье, Западная и Восточная Сибирь, Урал. По уровню устойчивости к алюминию пшеница занимает промежуточное положение между слабоустойчивым ячменем и более устойчивыми культурами – овсом и рожью. Тем не менее кислотоустойчивые сорта пшеницы хорошо растут на почвах Красноярского края с pH 4,1–4,3 (Танделов, Ерышова, 2005). Поэтому целью настоящей работы было сравнительное изучение сортов яровой мягкой пшеницы мировой коллекции ВИР по уровню потенциальной алюмоустойчивости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись 113 сортов мягкой яровой пшеницы различного эколого-географического происхождения, полученных из мировой коллекции ВИР. В основе оценки уровня алюмоустойчивости – методика, разработанная в НИИСХ Северо-Востока (Лисицын, 2003): в условиях рулонной культуры используют дистиллированную воду в качестве контрольного варианта и водный раствор сульфата алюминия в концентрации 1,5 мМ Al, pH 4,3. По окончании опыта у каждого проростка определяют длину наибольшего корня и оценивают уровень алюмоустойчивости (ИДК – индекс длины корней) как отношение средних длин корней в опыте и контроле. По уровню алюмоустойчивости образцы были условно распределены на следующие группы, согласно работе Navacode с соавт. (2010): устойчивые (ИДК выше 65 %); умеренно устойчивые (ИДК 50–65 %); умеренно чувствительные (ИДК 40–49 %); неустойчивые (ИДК менее 40 %). Параллельно оценивалось влияние стрессора на накопление сухой массы корнями и ростками.

Повторность опытов трехкратная. На основе полученных 6 параметров, характеризующих развитие проростков пшеницы (длина корней, масса корней и ростков в контроле и в опыте), строили дендрограммы распределения сортов (кластерный анализ по методу Варда (Ward's method)) с использованием программы Statistica version 10 (StatSoft).

Оценку состояния фотосинтетического аппарата: содержание пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов) в листьях пшеницы, соотношение разных форм пигментов и распределение хлорофиллов между антенными комплексами и реакционными центрами фотосистем осуществляли после проведения фотометрического анализа вытяжек листьев на спектрофотометре UVmini-1240 производства SHIMADZU Corporation (Japan) при длинах волн 470 нм, 644,8 нм, 661,6 нм. Выделение пигментов и расчет их содержания проводили по методике Lichtenthaler и Bushmann (2001). В качестве экстрагента применяли 100 %-й ацетон.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе методом рулонной культуры потенциальной алюмоустойчивости 113 сортов яровой мягкой пшеницы было выяснено, что в группу устойчивых к стрессору могут быть отнесены 29 сортов, умеренно устойчивых – 71 сорт и оставшиеся 13 сортов относятся к группе умеренно чувствительных. Неустойчивых сортов (с ИДК ниже 40 %) не обнаружено.

Сорта с высоким уровнем алюмоустойчивости, как и сорта, умеренно чувствительные к данному типу эдафического стресса, могут происходить как из географически отдаленных местностей, так и из одной местности. Например, сорта из Омской, Самарской, Тюменской областей России, Казахстана и Украины покрывают весь диапазон изменчивости показателя ИДК в исследованной совокупности (соответственно от 47,9 до 66,2; от 46,2 до 67,4; от 48,9 до 68,6; от 47,9 до 65,3 и от 44,8 до 76,6 %). Для примера в табл. 1 приведены значения потенциальной алюмоустойчивости сортов мягкой яровой пшеницы, выведенных в селекционных учреждениях Сибири и европейской части России, значительно различающихся по почвенно-климатическим условиям.

Таким образом, прямой связи между почвенно-климатическими условиями места выведения сорта и уровнем его потенциальной алюмоустойчивости в нашем исследовании выявить не удалось. Даже сорта, выведенные в Кировской области, где кислые дерново-подзолистые почвы с повышенным содержанием подвижного алюминия занимают около 78 % пахотных земель, не обязательно будут иметь высокий уровень устойчивости к стрессу: ИДК сортов Баженка, Вятчанка и Свеча составляют

соответственно 54,1; 59,8 и 53,2 %, т. е. являются только умеренно устойчивыми.

Использование для оценки уровня устойчивости к стрессору только какого-либо одного показателя (в нашем случае ИДК) не может в полной мере отразить общую реакцию растения. Так, например, Hede с соавт. (2002) показали, что один и тот же уровень устойчивости к алюминию могут иметь растения с разной степенью роста корня в контроле. Естественно, растения, которые способны давать более мощные корневые системы в отсутствие стрессора, будут иметь преимущества перед менее мощными растениями, даже имеющими тот же уровень алюмоустойчивости. Недавно запатентован «Способ оценки кислотоустойчивости сельскохозяйственных растений» (2014), при котором для интегральной оценки устойчивости также используются несколько параметров развития растений: масса корней, ростков, целого растения и длина ростков. Как видно, основное отличие этого способа от нашего состоит в измерении длины ростка вместо длины корня. Очевидно, авторы не использовали показатель длины корней из-за особенностей предлагаемой ими методики – при выращивании растений в чашках Петри корни не имеют возможности нормально расти вниз и поэтому их длина перестает определяться действием только стрессора.

Поэтому для интегральной оценки устойчивости к алюминию нами был принят во внимание характер развития целого растения в отсутствие и при наличии стрессового воздействия, а для кластерного анализа были использованы показатели длины корня и накопления сухой массы корнями и ростками растений. В результате проведенного анализа весь набор изученных сортов разделился на 5 кластеров (рис.) по линии linkage distance = 10.

В первый кластер, имеющий наибольший средний показатель ИДК (67,1 %), вошло всего 8 сортов. Самой обширной группой является второй кластер, состоящий из 46 сортов различного эколого-географического происхождения.

Третий кластер на 65 % представлен сортами сибирской селекции (17 сортов из 26). Более половины (8 из 14) пятого кластера также составляют сибирские сорта мягкой яровой пшеницы. Четвертый кластер (19 сортов) является самым «пестрым» по географическому

Таблица 1
Потенциальная алюмоустойчивость
сортов яровой мягкой пшеницы

Сорт	Регион	ИДК, %
Сорта сибирской селекции		
Тюменская 27	Тюменская область	48,9
Тюменская 26		54,5
Тюменская 28		73,4
Бирюса	Красноярский край	50,0
Саяногорская		53,2
Солянская		60,5
Лавруша	Омская область	47,1
Омская 39		54,3
Серебристая		66,2
Линия 3672h	Иркутская область	53,5
Линия 3691h		61,4
Линия 2		67,1
Сударушка	Новосибирская область	46,5
Соановская 5		54,7
Легенда		69,9
Дарница	Кемеровская область	46,7
Мария 1		67,4
Сорта европейской селекции		
Эстивум 155	Самарская область	49,4
Лютесценс 101		63,6
Лютесценс 30		78,8
Маргарита	Ульяновская область	56,4
Симбирцит		62,9
Спурт	Татарстан	59,1
Тимер		64,7
Закамская		68,8
Челяба золотистая	Челябинская область	53,7
Челяба степная		61,7

Дендрограмма для 13 сортов. Метод Варда.
Евклидово расстояние

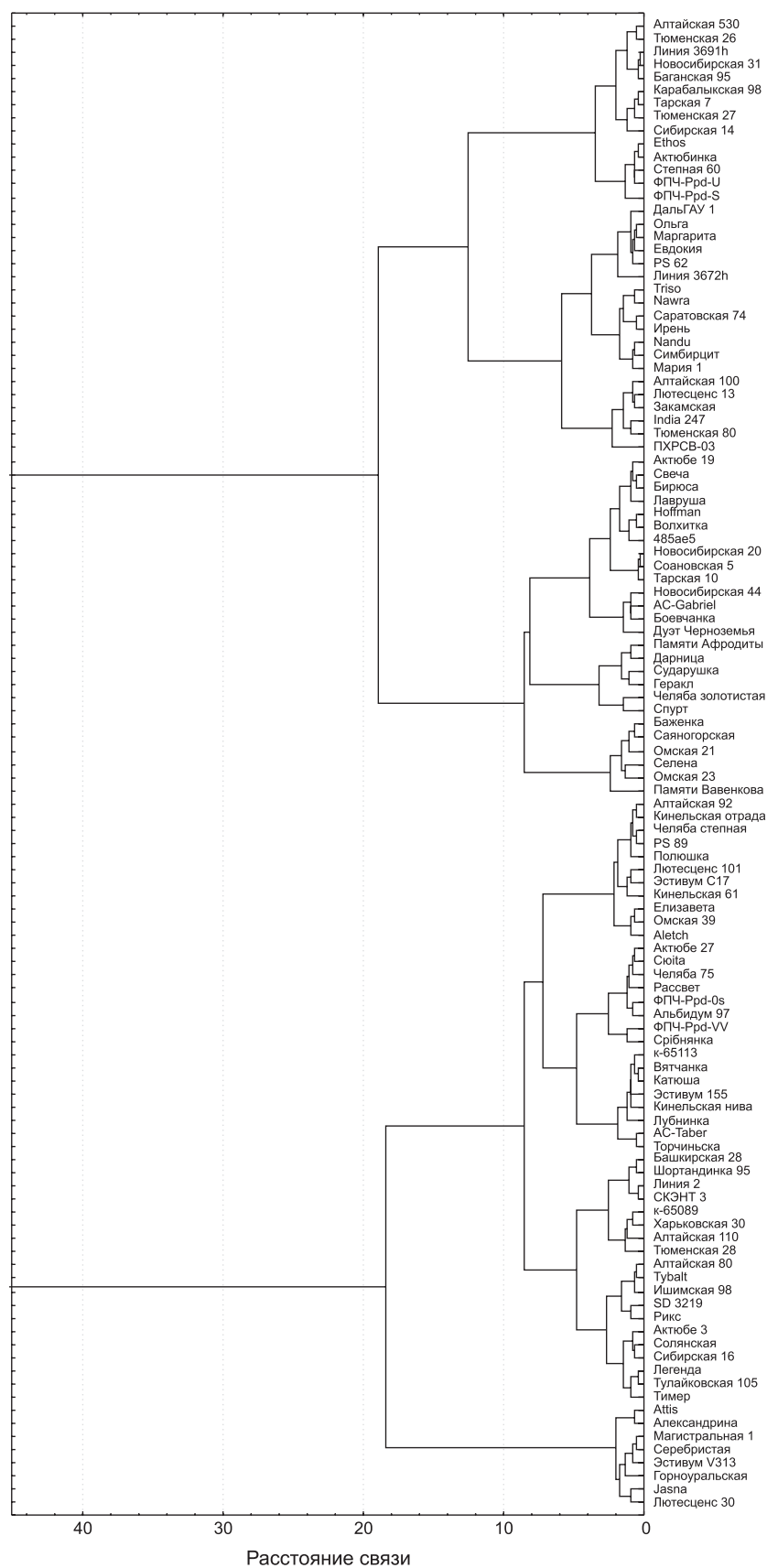


Рис. Дендрограмма распределения 113 образцов яровой мягкой пшеницы по алюмоустойчивости.

происхождению сортов. Усредненные данные по параметрам роста растений пшеницы каждого из кластеров и в среднем по выборке из 113 сортов приведены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, во-первых, что стресс в наибольшей степени проявился на таком параметре роста, как длина корней, а в наименьшей – на массе ростков; во-вторых, сорта, попавшие в первый кластер, хотя и показывают наименьшую реакцию на стрессор (ИДК 67,1 %), но при этом имеют наименьшую силу роста корня. Сорта четвертого кластера чуть менее устойчивы (ИДК 62,6 %), но при этом абсолютные показатели роста корней (длина и масса) как в контроле, так и в опыте говорят об их преимуществах по сравнению с остальными сортами. Сорта третьего кластера имеют наибольшие абсолютные показатели развития в контроле, но при этом депрессия роста корней под действием ионов алюминия составляет 45 %.

В первый и четвертый кластеры выделились только устойчивые и умеренно устойчивые сорта, в пятый кластер не попал ни один устойчивый сорт, а во втором и третьем кластерах есть сорта всех трех групп устойчивости, хотя и преобладают умеренно устойчивые образцы (60 и 70 % выборки соответственно). Коэффициент корреляции между уровнем устойчивости и номером кластера равен 0,248, что говорит об относительной независимости уровня алюмоустойчивости, определенной по ИДК, и ин-

тегральным уровнем устойчивости с учетом 6 суммарных параметров развития растений.

Для оценки различия в развитии надземных органов растений нами были рассмотрены особенности развития листового аппарата сортов пшеницы, контрастных по потенциальной алюмоустойчивости: устойчивых Эстивум V313 и Легенда (1-й кластер); умеренно чувствительных Эстивум 155 (2-й кластер) и Сибирская 14 (5-й кластер). Результаты показали, чем выше у сорта уровень ИДК (т. е. устойчивость корневых систем на начальных стадиях развития), тем в большей степени он изменял рост надземных органов. Так, один из устойчивых сортов (Легенда, ИДК = 67 %) на стадии выхода в трубку имел в опыте листья чуть короче (на 9 %), чуть уже (на 14 %), чем в контроле, что привело к снижению площади листа на 20 %. Однако количество листьев достоверно больше, что делает отличие в общей площади листьев растения статистически незначимым. К следующей стадии роста (колошение) длина листьев уже не отличалась от контроля, ширина листьев также несколько увеличилась и площадь листа в опыте меньше контроля уже всего на 14 % и остается такой до цветения.

Сорт Эстивум V313 также имел высокий уровень ИДК (68 %) и также показал изменение параметров роста листьев под влиянием стрессора, но по сравнению с сортом Легенда основное отличие от контрольного варианта связано с длиной листа: под влиянием алю-

Таблица 2

Средние ростовые параметры сортов яровой мягкой пшеницы, принадлежащих разным кластерам в пересчете на одно растение

Кластер	Длина корня, см	Масса корня, мг	Масса ростка, мг	ИДК, %
1	6,77 ± 0,13	2,78 ± 0,09	3,34 ± 0,16	67,1
	4,54 ± 0,14	2,49 ± 0,07	3,36 ± 0,09	
2	8,05 ± 0,08	3,13 ± 0,05	4,66 ± 0,06	62,0
	4,99 ± 0,08	2,61 ± 0,05	4,60 ± 0,07	
3	9,63 ± 0,13	3,95 ± 0,09	6,34 ± 0,12	54,7
	5,27 ± 0,13	3,09 ± 0,06	6,26 ± 0,14	
4	9,24 ± 0,09	3,92 ± 0,08	5,16 ± 0,10	62,6
	5,78 ± 0,12	3,31 ± 0,08	5,02 ± 0,10	
5	8,83 ± 0,12	3,38 ± 0,08	5,54 ± 0,07	53,9
	4,76 ± 0,07	2,52 ± 0,04	5,20 ± 0,09	

Примечание. Верхняя строка – контроль, нижняя строка – 1,5 мМ Al.

миния длина листа достоверно увеличилась (на стадии трубкования – 123 %, а на стадии цветения – 114 %), повышая среднюю площадь листа (на 25...30 %). Но при этом общая площадь листьев на растении не отличалась от контроля, видимо, из-за недостоверного, но снижения числа листьев.

Оба умеренно чувствительных сорта (Сибирская 14 имеет ИДК 47 %, Эстивум 155 – 49 %) практически не имели отличий в развитии листового аппарата. Объяснить это явление можно тем, что в начале адаптационного периода эти сорта перераспределяют фотоассимиляты в сторону поддержания развития листовой части растений, соответственно, рост корней резко тормозится.

Что касается устойчивых сортов, то наблюдаются две различные стратегии приспособления. Сорт Легенда адаптируется к стрессовому воздействию, снижая общий уровень метаболизма. При этом снижение роста корневых систем и листового аппарата примерно равно 20 %. Сорт Эстивум V313 показывает пропорциональное перераспределение биомассы – на сколько процентов снижается рост корней (20 %),

на столько же усиливается нарастание листовой поверхности (25...30 %).

Сорт Сибирская 14 на стадии трубкования, имея одинаковую площадь листовой поверхности как в опыте, так и в контроле, тем не менее, под действием стрессора достоверно снижал содержание обеих форм хлорофилла и долю хлорофилла *a* в светособирающих комплексах хлоропластов. В дальнейшем содержание хлорофиллов начинает повышаться: к стадии колошения содержание хлорофилла *a* в листьях стрессовых растений выравнивалось с контрольным вариантом, а к стадии цветения превысило контрольные значения. В это время содержание хлорофилла *b* вышло на уровень контроля (табл. 3).

Сорт Эстивум 155, наоборот, постепенно снизил содержание хлорофиллов в листьях, к стадии цветения их содержание составило 98–83 % от контрольных величин. Сорт Легенда на всех изученных стадиях имел повышенное содержание как хлорофиллов (103–106 % от контроля), так и каротиноидов (105–110 %). Растения сорта Эстивум V313 в условиях стрессового воздействия алюминия по содержанию

Таблица 3

Относительное содержание пигментов в листьях сортов пшеницы при воздействии ионов алюминия (% от контрольного варианта)

Сорт	Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Каротиноиды	Доля хлорофилла <i>a</i> в ССК
Трубкование				
Сибирская 14	91,00*	81,77*	95,37	93,13*
Эстивум 155	103,47*	100,41	101,13	98,10
Легенда	106,65*	109,50	102,46	101,77
Эстивум V313	100,61	99,52	96,78	99,14
Колошение				
Сибирская 14	98,38	92,85*	101,78	96,69*
Эстивум 155	99,42	88,66*	106,31*	93,00*
Легенда	105,73*	103,76*	105,09	98,92
Эстивум V313	98,64	99,46	90,29*	100,57
Цветение				
Сибирская 14	107,04*	95,33	116,34*	93,30
Эстивум 155	96,19	87,16*	108,03	93,37*
Легенда	106,62*	101,27	110,91*	97,00
Эстивум V313	94,17	87,13	101,93	93,64

Примечание. * Отличие от контроля статистически значимо при $p < 0,05$.

пигментов и доли хлорофилла, а в светособирающих комплексах фотосистем на всех стадиях не отличались от контроля.

Таким образом, под действием алюминия устойчивые сорта могут более качественно использовать энергию солнечного света для синтеза ассимилятов и их использования для построения растительного организма. В то же время можно видеть значительные различия в развитии надземных органов растений сортов яровой мягкой пшеницы, принадлежащих разным кластерам.

В ходе анализа полученных данных выяснено, что сорта, имеющие в родословной одного и того же родителя, попадали в достаточно отдаленные кластеры. Так, например, сорта Тюменская 80 (4-й кластер) и СКЭНТ 3 (2-й кластер) в качестве одного из родителей имеют сорт Саратовская 29, а сорт Баганская 95 (5-й кластер) – это результат индивидуального отбора из указанного сорта. Другие пары родственных сортов, попавших в разные кластеры: Баженка (3-й кластер) и Ирень (4-й кластер) (общий родитель – сорт Иргина); Баженка и Башкирская 28 (2-й кластер) (общий родитель – сорт Приокская); Мария 1 (4-й кластер) и Дарница (3-й кластер) (общий родитель – сорт Лютесценс 105); Мария 1 и Полюшко (2-й кластер) (общий родитель – сорт Новосибирская 22); Челябинка 75 (2-й кластер) и Серебристая (1-й кластер) (общий родитель – сорт ОмсСХИ-6); Памяти Афродиты (3-й кластер) и Александрина (1-й кластер) (общий родитель – сорт Кантегирская 89). Особенно надо отметить значительное расхождение по параметрам роста растений сортов Алтайская 110 (2-й кластер) и Алтайская 530 (5-й кластер), являющихся результатом отбора из одной комбинации скрещивания ((Лютесценс 281 × к-54975) × Лютесценс 281). То есть сорта Саратовская 29, Иргина, Приокская, Лютесценс 105, Новосибирская 22, ОмсСХИ-6 и Кантегирская 89, скорее всего, не будут являться донорами признака алюмоустойчивости.

Только две пары родственных сортов практически не отличались друг от друга по интегральной оценке устойчивости к алюминию (принадлежали одному кластеру) – это сорта Свеча и Боевчанка (3-й кластер, общий родитель – сорт Bastian) и сорта Кинельская нива и Кинельская отрада (2-й кластер), родственные

через сорт Тулайковская 1. Поскольку сорта третьего кластера показали наибольший уровень интегральной алюмоустойчивости, можно предположить, что сорт Тулайковская 1 несет в себе гены повышенной алюмоустойчивости.

Место выведения сорта не оказало систематического влияния на интегральную характеристику алюмоустойчивости. Различные сорта одного географического происхождения обнаруживаются в разных кластерах: например, сорта новосибирской селекции могут быть обнаружены в первом (Александрина), втором (Легенда, Лубнинка), третьем (Сударушка, Памяти Вавенкова), четвертом (Ольга) и пятом (Баганская 95, Сибирская 14) кластерах. То же можно сказать о сортах самарской селекции: Лютесценс 30 и Эстивум V313 обнаружены в первом кластере, сорта Тулайковская 105, Кинельская нива и Кинельская отрада – во втором, сорт 485ae5 – в третьем, Лютесценс 13 – в четвертом. Изученные сорта казахстанской селекции распределились по трем кластерам – второму (Шортандинская 95, Актюбе 3, Актюбе 27), третьему (Актюбе 19) и пятому (Степная 60 и Актюбинка). Аналогичные заключения можно сделать по сортам, выведенным в Алтайском крае, Татарстане, Тюменской области.

Азиатская часть России, в частности Сибирь, отличается в рамках обсуждаемого вопроса от европейской части тем, что кислые почвы Сибири практически не содержат подвижного алюминия. Даже при pH 4,4 на дерново-подзолистых почвах Красноярского края содержание подвижного алюминия достигает величины только 0,079 мг-экв/100 г (Танделов, 2012). Хотя сибирские почвы содержат относительно большее количество органического вещества, чем почвы европейской Нечерноземной зоны, данные, полученные, например, Ganapça с соавт. (2007), указывают на то, что для культивируемых зерновых культур уровень алюмоустойчивости не коррелирует с содержанием органического вещества. Известно, однако, что растения адаптируются к кислотному стрессу и токсичности алюминия посредством одних и тех же механизмов (Sawaki *et al.*, 2009). Как указывают Yang с соавт. (2005), алюмоустойчивость подразумевает устойчивость к низкой pH, поскольку токсичность алюминия проявляется только при величинах pH ниже 5,0. Авторы

считают, что все алюмоустойчивые генотипы являются одновременно и кислотоустойчивыми, но далеко не все кислотоустойчивые генотипы будут устойчивы к действию алюминия. Фактом, косвенно подтверждающим возможность создания алюмоустойчивых генотипов в условиях отсутствия стрессового агента, могут служить наблюдаемые при селекции *in vitro* случаи получения кислото- и алюмоустойчивых регенерантов в контрольных вариантах (Иванов, 2001).

Известно, что ответ на биотический стресс чаще всего определяется простыми генными локусами, а ответ на воздействие абиотического стрессора имеет комплексную генетическую основу. Кроме того, многие первичные стрессоры, такие как засуха, засоление, холод, жара, химическое загрязнение и т. д., часто происходят одновременно и приводят к проявлению действия вторичных стрессоров (Kosakivska, 2008).

Даже если учесть, что в любом селекцентре выводят сорта, наиболее адаптированные к местным условиям (в том числе почвенным), все-таки, как нам представляется на основании полученных данных, ведущую роль в создании алюмоустойчивых сортов будет играть генотип сортов, взятых в скрещивания, а не наличие на территории селекцентра кислых (алюмокислых) почв.

Необходимо отметить тот факт, что исследованные нами сорта не являлись итогом целенаправленной селекции на устойчивость к кислым почвам или к алюминию. Многие из них приспособлены к абиотическим стрессам региона выведения, в частности к засухе, часто случающейся и в Сибири (Половинкина, Клименко, 2013), и в Поволжье (Глуховцев, 2012), или неадекватности содержания элементов минерального питания (Асхадуллин Д.Ф., Асхадуллин Д.Ф., 2012). Поскольку реакция растений на разные типы абиотических стрессоров в первые недели воздействия определяется механизмами неспецифической устойчивости (Шакирова, 2001), то повышение устойчивости селекционных образцов и сортов к любому из подобных стрессов может параллельно приводить и к усилению признака кислото-, алюмоустойчивости. Так, засухоустойчивые сорта пшениц отличаются большим числом корней и их суммарной массой, что позволяет им лучше противостоять засухе (Давыдова, 2011). В на-

шем исследовании коэффициенты корреляции между длиной и сухой массой корней были значимы при $p < 0,01$ и составили для сибирских и европейских сортов соответственно 0,686 и 0,741 в контроле, 0,654 и 0,652 при действии алюминия, что говорит о тесной связи этих двух параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что яровая мягкая пшеница имеет широкий спектр генотипического разнообразия по реакции на стрессовое воздействие ионов алюминия. Выяснено, что независимо от региона происхождения образцы яровой мягкой пшеницы могут иметь разный уровень устойчивости к этому стрессовому эдафическому фактору. Среди изученного материала не обнаружено сортов, неустойчивых к действию стрессора. Селекция на устойчивость к какому-либо абиотическому стрессору может параллельно повышать уровень устойчивости растений к алюминию.

ЛИТЕРАТУРА

- Асхадуллин Д.-л.Ф., Асхадуллин Д.-р.Ф. Фоны для отбора в селекции озимой пшеницы // Развитие научного наследия Н.И. Вавилова в современных селекционных исследованиях: Матер. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 125-летию со дня рождения Н.И. Вавилова. Казань: Центр инновационных технологий, 2012. С. 54–59.
- Баталова Г.А., Лисицын Е.М. О селекции овса на устойчивость к эдафическому стрессу // Селекция и семеноводство. 2002. № 2. С. 17–19.
- Глуховцев В.В. Особенности адаптивной селекции зерновых культур в Среднем Поволжье в свете учения Н.И. Вавилова // Развитие научного наследия Н.И. Вавилова в современных селекционных исследованиях: Матер. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 125-летию со дня рождения Н.И. Вавилова. Казань: Центр инновационных технологий, 2012. С. 29–37.
- Давыдова Н.В. Селекция яровой пшеницы на урожайность и качество зерна в условиях центра нечерноземной зоны Российской Федерации: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Немчиновка, 2011. 54 с.
- Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФБГНУ «Росинфоагро-тех», 2011. 148 с.
- Иванов М.В. Биотехнологические основы создания исходного материала ярового ячменя. СПб.-Пушкин: Изд-во ГНЦ ВИР, 2001. 205 с.
- Крупнов В.А. Генетическая сложность и контекст-специфичность признаков урожая пшеницы в засушливых ус-

- ловиях // Вавилов. журн. генет. и селекции. 2013. Т. 17. № 3. С. 524–534.
- Лисицын Е.М. Методика лабораторной оценки алюмоустойчивости зерновых культур // Докл. РАСХН. 2003. № 3. С. 5–7.
- Лисицын Е.М., Баталова Г.А., Щенникова И.Н. Динамика посевных площадей и продуктивности ячменя и овса в различных регионах Европейской России, имеющих кислые дерново-подзолистые почвы // Создание сортов овса и ячменя для кислых почв. Теория и практика. Palmarium Acad. Publ., Saarbrücken, Germany, 2012. С. 11–28.
- Половинкина С.В., Клименко Н.И. Эмбриогенез растений мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в условиях Сибири. Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2013. 136 с.
- Способ оценки кислотоустойчивости сельскохозяйственных растений: Пат. RU 2505958. № 2011149832/10; Заяв. 07.12.2011, Опубл. 10.02.2014. Бюл. № 4. 7 с.
- Танделов Ю.П. Плодородие кислых почв земледельческой территории Красноярского края. Красноярск, 2012. 161 с.
- Танделов Ю.П., Ерышова О.В. Отношение сортов сельскохозяйственных культур к почвенной кислотности // Агрохим. вестник. 2005. № 4. С. 30–32.
- Шакирова Ф.М. Неспецифическая устойчивость растений к стрессовым факторам и ее регуляция. Уфа: Гилем, 2001. 160 с.
- Ganança J.F.T., Abreu I., Sousa N.F., Paz R.F., Caldeira P., dos Santos T.M.M., Costa G., Slaski J.J., Pinheiro de Carvalho M.Â.A. Soil conditions and evolution of aluminium resistance among cultivated and wild plant species on the Island of Madeira // Plant Soil Environ. 2007. V. 53. No. 6. P. 239–246.
- Hede A.R., Skovmand B., Ribaut J.-M., González-de-León D., Stølen O. Evaluation of aluminium tolerance in a spring rye collection by hydroponic screening // Plant Breeding. 2002. V. 121. P. 241–248.
- Kosakivska I.V. Biomarkers of plants with different types of ecological strategies // Gen. Appl. Plant Physiol. 2008. Spec. Iss. V. 34 (1/2). P. 113–126.
- Lichtenthaler H.K., Bushmann C. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy // Curr. Prot. Food Analyt. Chem. 2001. F4.3.1–F4.3.8.
- Navacode S., Weidner A., Varshney R.K., Lohwasser U., Scholz U., Roder M.S., Börner A. A genetic analysis of aluminium tolerance in cereals // Agric. Conspec. Sci. 2010. V. 75. No. 4. P. 191–196.
- Sawaki Y., Iuchi S., Kobayashi Y., Kobayashi Y., Ikka T. *et al.* STOP1 regulates multiple genes that protect Arabidopsis from proton and aluminum toxicities // Plant Physiol. 2009. V. 150. P. 281–294.
- Sofalian O., Chaparzadeh N., Dolati M. Genetic diversity in spring wheat landraces from northwest of Iran assessed by ISSR markers // Not. Bot. Hort. Agrobot. 2009. No. 37. P. 252–256.
- Yang J.L., Zheng S.J., He Y.F., Matsumoto H. Aluminium resistance requires resistance to acid stress: a case study with spinach that exudes oxalate rapidly when exposed to Al stress // J. Exp. Bot. 2005. V. 56. No. 414. P. 1197–1203.

GENETIC VARIABILITY OF SPRING COMMON WHEAT VARIETIES IN ALUMINUM TOLERANCE

E.M. Lisitsyn^{1,2}, O.S. Amunova¹

¹ Rudnitsky North-East Agricultural Research Institute, Kirov, Russia;

² Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia,

e-mail: edaphic@mail.ru

Summary

Spring common wheat varieties display broad genotypic diversity in response to the stress impact of aluminum ions. The investigated set of varieties contained no sensitive ones. Moderately tolerant varieties constituted about 63 %, and highly tolerant, about 25,5 %. The remaining 11,5 % of varieties were moderately sensitive to aluminum treatment. Accessions of spring common wheat have different levels of aluminum tolerance irrespective of sampling locality. The set of wheat varieties showed a significant genetic diversity in the manifestation of the response of chloroplast pigments to the stressor. The structure-functional rearrangement of the leaf pigment apparatus was variety-specific. It showed no strong relation to the level of aluminum tolerance in the root systems. Cluster analysis divided the entire set of varieties into 5 groups with different combinations of root length and plant vigor both in the control and in the presence of aluminum. The authors suggest that the increase in aluminum tolerance in spring common wheat varieties occurs indirectly alongside the breeding aimed at increasing plant resistance to abiotic environmental factors.

Key words: wheat, variety, stress, cluster analysis, pigments.