

Использование морфофизиологических параметров проростков яровой пшеницы в селекции на алюмоустойчивость

Л. В. Волкова¹✉, О. С. Амунова¹, Л. Н. Тиунова¹

¹ Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого, Киров, Россия

✉ E-mail: volkovkirov@mail.ru

Аннотация. Цель работы – определение эффективности методов ранней диагностики на устойчивость к ионам алюминия. Изучено 15 гибридных популяций F_2-F_4 яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), созданных с участием сортов Алтайская 530, Баганская 95, Тюменская 26, Карабалыкская 98, Горноуральская, Лютесценс 30, Серебристая, Jasna. **Методы.** В ходе исследования были использованы следующие методы: лабораторная оценка на устойчивость к ионам алюминия в фазу проростков; полевые испытания в двух пунктах, различающиеся по уровню pH и содержанию подвижных ионов алюминия (фон 1: pH = 4,3; Al^{3+} = 5,4 мг/кг почвы; фон 2: pH = 3,8; Al^{3+} = 211,0 мг/кг почвы); статистическая обработка результатов. **Результаты.** По индексу длины корней не установлено достоверных различий между генотипами, большинство изучаемых образцов характеризовались как высокоустойчивые (ИДК = 80...100 %). Высокой генотипической обусловленностью характеризовались следующие показатели: длина зародышевых корней, сухой вес проростков и соотношение масс корней и ростков (root to shoot ratio – RSR). Полевую устойчивость оценивали по процентному снижению признаков. Наибольшая реакция на условия жесткого эдафического стресса отмечена по урожайности (7,1–16,9 % от нормы в зависимости от комбинации), наименьшая – по содержанию каротиноидов (78,0–111,0 %) и массе 1000 зерен (67,7–89,3 %). Не обнаружено значимых корреляций между ИДК, длиной зародышевых корней и полевой устойчивостью. Выявлена тенденция усиления корреляций до средних положительных либо достоверных значений между лабораторными характеристиками (длина зародышевых корней, масса проростков) и полевыми параметрами (размеры флаговых листьев, содержание хлорофиллов, элементы продуктивности колоса, урожайность) при переходе от фона 1 к фону 2. Способность к перераспределению биомассы в пользу надземной части растений в фазу проростков (индекс RSR) оказывала значимое положительное влияние на элементы продуктивности на обоих фонах. **Научная новизна.** Выявлены и рекомендованы для отбора на устойчивость к ионам алюминия морфофизиологические характеристики проростков: длина корня, сухая масса проростка, индекс RSR.

Ключевые слова: яровая пшеница, гибридные популяции, проростки, устойчивость к алюминию, элементы продуктивности, урожайность.

Для цитирования: Волкова Л. В., Амунова О. С., Тиунова Л. Н. Использование морфофизиологических параметров проростков яровой пшеницы в селекции на алюмоустойчивость // Аграрный вестник Урала. № 04 (207). С. 24–33. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-24-33.

Дата поступления статьи: 05.03.2021.

Постановка проблемы (Introduction)

Одной из актуальных проблем современного растениеводства в России является негативное влияние повышенной почвенной кислотности на урожайность зерновых культур. В Российской Федерации почти 30 % пахотных земель характеризуются как сильно- и среднекислые [1, с. 614]. Особенно остро эта проблема стоит на северо-востоке Европейской России, где преобладают дерново-подзолистые почвы с повышенной кислотностью и низким уровнем естественного плодородия. Возделывание кислотоустойчивых сортов в таких условиях обеспечивает большую и стабильную урожайность сельскохозяйственных культур. О возможности создания новых конкурентоспособных сортов зерновых культур, толерантных к почвенной кислотности, свидетельствуют исследования, проведенные в различных регионах России [2]. Кроме

прибавки урожая, устойчивые к ионной токсичности сорта характеризуются более высокой отзывчивостью на минеральные удобрения и мелиоранты, что позволяет снизить себестоимость продукции [3, с. 385].

Селекция растений должна базироваться на знаниях не только о физиологических механизмах устойчивости, но и о закономерностях формирования признаков в различных условиях среды выращивания: оптимальных и при воздействии естественных абиотических стрессов. В системе косвенного отбора особая роль принадлежит оценке растений на ранних (ювенильных) стадиях их роста [4, с. 27], [5, с. 46], поэтому в последние годы широкое распространение получили лабораторные тесты, которые позволяют быстро диагностировать генотипы по алюмоустойчивости [6, с. 38], [7, с. 122]. При содержании в питательной среде в больших количествах алюминий быстро поглощается

корнями и локализуется в оболочках клеток. В результате этого снижается активность деления клеток корня, уменьшаются длина, масса корней, количество корневых волосков и их абсорбирующая поверхность [8, с. 515], [9, с. 315], [10]. Поэтому в первую очередь необходимо акцентировать внимание на развитии корневой системы проростков. Яровая мягкая пшеница имеет широкий спектр генотипического разнообразия по реакции корневой системы на стрессовое воздействие [11], и анализируемые при оценке исходного материала параметры должны обладать высоким межсортовым полиморфизмом. Выявление наиболее простых и в то же время информативных физиолого-морфологических параметров, свидетельствующих об устойчивости растительного организма к ионной токсичности Al^{3+} , особенно актуально на начальных этапах селекции, для гибридов ранних поколений, поскольку позволяет значительно ускорить селекционный процесс.

Цель работы – определить эффективность методов ранней диагностики по некоторым морфофизиологическим характеристикам проростков яровой пшеницы в селекции на устойчивость к алюминию.

Методология и методы исследования (Methods)

Для исследований использовали 15 гибридных популяций яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), полученных от скрещивания сортов, различающихся по уровню продуктивности и алюмоустойчивости: Алтайская 530, Баганская 95, Тюменская 26, Карабалыкская 98 (материнские формы); Горноуральская, Лютеценс 30, Серебристая, Jasna (отцовские формы). В 2018–2020 гг. в фазу проростков гибриды трех смежных поколений F_2 – F_4 подвергали лабораторной оценке по методике [12]. В качестве стрессового воздействия использовали ионы алюминия (1,5 мМ сульфата алюминия при pH 4,3) для имитации почвенной алюмокислотности – главного стрессового фактора кислых дерново-подзолистых почв. Уровень устойчивости оценивали по величине индекса длины корней (ИДК), рассчитываемого по соотношению длин наибольшего корня в опыте и контроле, а также общей биомассе проростков и величине соотношения сухих масс корней и ростков (индекс root to shoot ratio – RSR). В 2020 г. гибридное поколение F_4 дополнительно изучали в полевых условиях на делянках площадью 4,5 м², в двух пунктах: ФАНЦ Северо-Востока (фон 1) и Фаленская селекционная станция (фон 2). Почва на двух участках испытания дерново-подзолистая среднесуглинистая, с содержанием гумуса 2,2 %, различающаяся по уровню pH (фон 1: pH = 4,3; фон 2: pH = 3,8) и содержанию подвижных ионов алюминия (фон 1: Al^{3+} = 5,4 мг/кг почвы; фон 2: Al^{3+} = 211,0 мг/кг почвы). Полевую устойчивость оценивали по снижению размеров листового аппарата, количества хлорофилльных пигментов, основных элементов продуктивности и урожайности. Статистическую обработку результатов проводили с помощью дисперсионного, а также парного корреляционного анализов. Коэффициенты фенотипической корреляции между признаками рассчитывали при численности выборки $n = 15$, считая достоверными значения $r \geq 0,51$ и $r \geq 0,59$ соответственно при 5- и 1-процентном уровне значимости.

Результаты (Results)

При диагностике устойчивости широко используют индекс длины корня (ИДК) как отношение длины корня растений при стрессе к контрольным значениям. Принято считать, что наиболее устойчивые генотипы сохраняют или в слабой степени снижают соотношение длины корней. Согласно шкале [12], большинство изучаемых образцов F_2 – F_4 характеризовались как высокоустойчивые (ИДК 80...100 %). Гибридные комбинации Карабалыкская 98 × Лютеценс 30 и Карабалыкская 98 × Jasna отнесены к группе устойчивых (ИДК 60...80%). По индексу длины корней не установлено достоверных различий между генотипами ($F_{\text{факт}} = 1,13$), что наряду с низкой повторяемостью признака в ряду трех поколений ($r = -0,215...0,217$) не позволило четко дифференцировать изучаемые гибридные популяции по данному параметру (таблица 1).

Считается, что растения с более развитой первичной корневой системой имеют преимущества за счет лучшего использования ресурсов почвы [13]. В литературе есть указания о выраженной сортовой специфичности развития корневой системы проростков [14, с. 196], [15, с. 22], что может быть использовано в практической селекции. Поэтому важно обращать внимание на развитие зародышевых корней не только при наличии стрессового воздействия, но и в его отсутствие. В отличие от относительного показателя ИДК, абсолютные значения длины корней в опыте и контроле характеризовались высокой генотипической обусловленностью ($F_{\text{факт}} = 3,79*...3,94*$). Это согласуется с данными предыдущих исследований [16, с. 15], где доказан высокий уровень наследуемости этого признака ($h^2 = 69,8...87,4$ %) и значимый вклад материнских компонентов. Исходя из средних трехлетних значений (таблица 1), достоверно высокими значениями длины корней в контроле характеризовались гибриды Карабалыкская 98 × Jasna, в опыте – Тюменская 26 × Jasna.

Накопление высокой биомассы растения на ранних этапах онтогенеза свидетельствует о высокой метаболической активности генотипа и о высоком темпе синтеза органического вещества. Предполагается, что такие генотипы хорошо усваивают питательные вещества при низкой их концентрации в субстрате, что соответствует понятию «агрохимически эффективного сорта» [17, с. 291]. В нашем исследовании отмечена высокая межсортовая специфичность по весу проростков как в нормальных условиях, так и в растворе сульфата алюминия ($F_{\text{факт}} = 3,00*...3,03*$). Общее снижение показателя при стрессе составило 4,0 %, с изменением от +3,4 до –10,3 % в зависимости от комбинации. Гибрид Баганская 95 × Горноуральская достоверно превосходил среднее групповое значение по сухой массе проростка в контроле и опыте, Тюменская 26 × Jasna – в опыте. Достоверно низким весом проростков в контроле характеризовался гибрид Алтайская 530 × Серебристая, однако при общей тенденции к снижению массы проростков при воздействии стресса у данного генотипа наблюдалось ее повышение. Незначимое снижение либо повышение массы проростка под воздействием алюмокислого стресса у некоторых гибридов можно объяснить результатом действия механизмов детоксикации, в частности внутриклеточного хелатирования ионов тяжелых металлов с участием органических кислот [18].

Таблица 1

Характеристика гибридов F_2-F_4 по устойчивости к ионам алюминия в фазу проростков (2018–2020 гг.)

Гибридная комбинация	ИДК, %	Длина корня, см		Сухой вес проростка, мг		Индекс RSR	
		Контроль	Опыт	Контроль	Опыт	Контроль	Опыт
Алтайская 530 × Лютесценс 30	83,9	10,3	8,6	7,88	7,61	0,85	0,86
Алтайская 530 × Jasna	87,1	10,0	8,7	7,82	7,79	0,99*	0,93*
Алтайская 530 × Горноуральская	86,6	9,4	8,1	7,78	7,64	0,85	0,83
Алтайская 530 × Серебристая	88,7	9,2	8,1	7,09	7,33	0,86	0,86
Баганская 95 × Лютесценс 30	84,7	10,6	9,0	8,39	8,30	0,87	0,80
Баганская 95 × Jasna	83,4	11,1	9,2	9,35	8,53	0,85	0,81
Баганская 95 × Горноуральская	85,4	11,1	9,5	9,88*	9,42*	0,74	0,74
Баганская 95 × Серебристая	83,5	11,4	9,5	8,87	8,09	0,80	0,79
Карабалыкская 98 × Лютесценс 30	79,7	11,4	9,1	8,30	7,86	0,84	0,80
Карабалыкская 98 × Jasna	77,9	12,3*	9,6	9,16	8,31	0,89	0,81
Карабалыкская 98 × Горноуральская	82,5	11,4	9,8	8,94	8,99	0,78	0,77
Карабалыкская 98 × Серебристая	82,2	11,6	9,5	8,59	8,51	0,83	0,74
Тюменская 26 × Лютесценс 30	81,4	10,9	8,9	8,39	7,52	0,87	0,79
Тюменская 26 × Jasna	81,7	12,2	9,9*	9,41	9,31*	0,91	0,83
Тюменская 26 × Серебристая	81,8	11,7	9,5	8,45	7,93	0,89	0,81
Среднее в опыте, n = 15	83,4	11,0	9,1	8,55	8,21	0,85	0,81
$F_{\text{факт}}$	1,13	3,94*	3,79*	3,03*	3,00*	4,23*	3,61*
$НСР_{05}$	–	1,3	0,8	1,23	1,08	0,08	0,07

Table 1

Characteristics of F_2-F_4 hybrids on resistance to aluminum ions in the seedling phase (2018–2020)

Hybrid combination	RLI, %	Roof length, cm		Dry weight of the seedling, mg		RSR Index	
		Control	Experience	Control	Experience	Control	Experience
Altayskaya 530 × Lutescens 30	83.9	10.3	8.6	7.88	7.61	0.85	0.86
Altayskaya 530 × Jasna	87.1	10.0	8.7	7.82	7.79	0.99*	0.93*
Altayskaya 530 × Gornouralskaya	86.6	9.4	8.1	7.78	7.64	0.85	0.83
Altayskaya 530 × Serebristaya	88.7	9.2	8.1	7.09	7.33	0.86	0.86
Baganskaya 95 × Lutescens 30	84.7	10.6	9.0	8.39	8.30	0.87	0.80
Baganskaya 95 × Jasna	83.4	11.1	9.2	9.35	8.53	0.85	0.81
Baganskaya 95 × Gornouralskaya	85.4	11.1	9.5	9.88*	9.42*	0.74	0.74
Baganskaya 95 × Serebristaya	83.5	11.4	9.5	8.87	8.09	0.80	0.79
Karabalykская 98 × Lutescens 30	79.7	11.4	9.1	8.30	7.86	0.84	0.80
Karabalykская 98 × Jasna	77.9	12.3*	9.6	9.16	8.31	0.89	0.81
Karabalykская 98 × Gornouralskaya	82.5	11.4	9.8	8.94	8.99	0.78	0.77
Karabalykская 98 × Serebristaya	82.2	11.6	9.5	8.59	8.51	0.83	0.74
Tyumenskaya 26 × Lutescens 30	81.4	10.9	8.9	8.39	7.52	0.87	0.79
Tyumenskaya 26 × Jasna	81.7	12.2	9.9*	9.41	9.31*	0.91	0.83
Tyumenskaya 26 × Serebristaya	81.8	11.7	9.5	8.45	7.93	0.89	0.81
Mean value. n = 15	83.4	11.0	9.1	8.55	8.21	0.85	0.81
F_{factual}	1.13	3.94*	3.79*	3.03*	3.00*	4.23*	3.61*
LSD_{05}	–	1.3	0.8	1.23	1.08	0.08	0.07

Высокая устойчивость растений может быть связана с увеличением затрат ассимилятов на рост корней, снижения ростовых процессов, т. е. тех показателей, которые ограничивают рост наземной биомассы и хозяйственной ее части [19, с. 401]. Способность перераспределять биомассу по органам и частям растений относят к важным ростовым адаптациям [20, с. 220], [21, с. 177] и зависит от экспрессии определенных генов, контролирующих гормональную регуляцию [22]. Дисперсионный анализ показал существенность различий между генотипами по индексу RSR (масса корня / масса ростка) ($F_{\text{факт}} = 4,23*...3,61*$). Достоверно высоким значением этого кри-

терия по отношению к среднему групповому значению отличалась гибридная комбинация Алтайская 530 × Ясна, достоверно низким – Баганская 95 × Горноуральская. Изменение индекса RSR показывает реализацию типа адаптивной стратегии к токсичности ионов алюминия. При переходе от нормальных условий к стрессовым индекс RSR снижался у большинства гибридов на 1,7... 10,0 %, т. е. происходило перераспределение биомассы в пользу наземной части. Такая закономерность прослеживается и в работах других исследователей [23]. В отдельных гибридных комбинациях (Алтайская 530 × Лютеценс 30, Алтайская 530 × Серебристая, Баганская 95 × Горноуральская) перераспределения биомассы не происходило.

Таблица 2

Корреляционная связь между лабораторными и полевыми оценками на устойчивость к алюминию

Показатель	ИДК		Длина корня		Масса проростка		RSR	
	Фон 1	Фон 2	Фон 1	Фон 2	Фон 1	Фон 2	Фон 1	Фон 2
Фаза колошения								
Длина флагового листа	0,076	-0,202	0,047	0,295	-0,065	0,420	-0,036	-0,543*
Ширина флагового листа	0,264	0,058	-0,073	0,185	0,466	0,530*	-0,627**	-0,524*
Площадь флагового листа	0,324	-0,081	-0,130	0,259	0,350	0,489	-0,533*	-0,540*
Хлорофилл А	0,135	-0,244	-0,242	0,119	0,006	0,242	0,134	-0,661**
Хлорофилл В	0,247	-0,336	-0,343	0,132	-0,128	0,167	0,455	-0,647**
Каротиноиды	-0,264	-0,259	0,210	0,199	0,296	0,297	-0,310	-0,608**
ССК	0,203	-0,412	-0,252	0,080	-0,211	-0,147	0,568*	-0,234
Фаза полной спелости								
Высота растений	0,255	-0,050	-0,294	0,070	-0,499	0,126	0,062	-0,337
Продуктивная кустистость	-0,639**	0,355	0,446	-0,444	0,021	-0,310	0,206	0,353
Длина колоса	0,404	-0,075	-0,095	0,415	0,234	0,573*	-0,526*	-0,415
Число колосков	0,368	0,012	-0,016	0,366	0,364	0,582*	-0,448	-0,432
Число зерен	0,030	-0,202	0,275	0,417	0,307	0,494	-0,344	-0,464
Масса зерна с колоса	0,074	-0,186	0,222	0,348	0,270	0,416	-0,469	-0,519*
Масса зерна с растения	-0,260	-0,166	0,397	0,327	0,208	0,402	-0,308	-0,506
Масса 1000 зерен	0,037	-0,096	0,148	0,108	0,164	0,224	-0,531*	-0,552*
Урожайность	0,321	0,200	-0,130	0,029	0,262	0,411	-0,046	-0,273

Примечание. *, ** – достоверно соответственно при 5 и 1 % уровнях значимости.

Table 2

Correlation between laboratory and field estimates of aluminum resistance

Parameter	RLI		Root length		Dry weight of the seedling		RSR Index	
	Field 1	Field 2	Field 1	Field 2	Field 1	Field 2	Field 1	Field 2
Earing phase								
Length of the flag sheet	0.076	-0.202	0.047	0.295	-0.065	0.420	-0.036	-0.543*
Flag sheet width	0.264	0.058	-0.073	0.185	0.466	0.530*	-0.627**	-0.524*
Flag Sheet area	0.324	-0.081	-0.130	0.259	0.350	0.489	-0.533*	-0.540*
Chlorophyll A	0.135	-0.244	-0.242	0.119	0.006	0.242	0.134	-0.661**
Chlorophyll B	0.247	-0.336	-0.343	0.132	-0.128	0.167	0.455	-0.647**
Carotenoids	-0.264	-0.259	0.210	0.199	0.296	0.297	-0.310	-0.608**
Light-collecting complex	0.203	-0.412	-0.252	0.080	-0.211	-0.147	0.568*	-0.234
Full ripeness phase								
Plant height	0.255	-0.050	-0.294	0.070	-0.499	0.126	0.062	-0.337
Productive bushiness	-0.639**	0.355	0.446	-0.444	0.021	-0.310	0.206	0.353
Ear length	0.404	-0.075	-0.095	0.415	0.234	0.573*	-0.526*	-0.415
Number of spikelets	0.368	0.012	-0.016	0.366	0.364	0.582*	-0.448	-0.432
Number of grains	0.030	-0.202	0.275	0.417	0.307	0.494	-0.344	-0.464
Grain weight per ear	0.074	-0.186	0.222	0.348	0.270	0.416	-0.469	-0.519*
Grain weight per plant	-0.260	-0.166	0.397	0.327	0.208	0.402	-0.308	-0.506
Mass of 1000 grains	0.037	-0.096	0.148	0.108	0.164	0.224	-0.531*	-0.552*
Yield	0.321	0.200	-0.130	0.029	0.262	0.411	-0.046	-0.273

Note. *, ** – significantly at 5 and 1 % significance levels.

Лабораторные методы, которые основаны на анатомо-морфологических признаках проростков, безусловно, ускоряют и упрощают анализ селекционного материала. Поэтому большой практический интерес представляет изучение соотношений между диагностическими критериями, определяющими лабораторную и полевую алюмоустойчивость генотипов. На этапе полевого изучения устойчивость оценивали по степени снижения ростовых и продукционных характеристик растений при воздействии стрессового фактора. Гибридные популяции были проанализированы на двух фонах по 16 показателям, 7 из которых – параметры фотосинтетической активности в фазу колошения (размеры флагового листа, содержание фотосинтетических пигментов). Согласно данным из литературных источников, критический предел содержания алюминия в почве, снижающий урожайность яровой пшеницы на 50–100 %, составляет 100–120 мг/кг почвы [24, с. 216], а наиболее высокая токсичность алюминия проявляется при pH ниже 4,0 [9, с. 315]. Избыток доступного алюминия на фоне низкого pH приводит к задержке роста и ограничению ветвления корней, мешает поглощению, транспорту и использованию ряда важнейших элементов. В надземных частях растения сокращается длина междоузлий, уменьшаются размеры листа, снижается интенсивность фотосинтеза и содержание хлорофиллов. Все это замедляет отток ассимилятов в репродуктивные органы и приводит к снижению урожая [25].

В почве Фаленской селекционной станции (фон 2) предельная концентрация алюминия была превышена в 2 раза. Высокая стрессовая нагрузка в период полевых испытаний подтверждается значительным снижением уровня продуктивности гибридного материала по сравнению с нормальными условиями (фон 1). Урожайность на кислом участке в зависимости от популяции составляла 24,5–58,8 г/м² (7,1–16,9 % от нормы), масса зерна с колоса – 0,23–0,75 г (24,7–63,7 %), высота растений – 38–56 см (42,0–64,8 %), масса 1000 зерен – 27,5–36,8 г (67,7–89,3 %), площадь флагового листа – 3,5–8,1 см² (43,0–92,5%), количество хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК) – 70,8–77,6% (77,0–90,6%). Максимальную урожайность в нормальных условиях формировал гибрид Баганская × Jansa (430 г/м²), в стрессовых – Тюменская × Jansa (58,8 г/м²).

Выявление корреляционных связей между параметрами лабораторных и полевых оценок позволяет определить значимость отдельных морфобиологических признаков в нормальных и лимитированных условиях. В системе соотношений «ИДК проростков» / «признаки продуктивности в фазы колошения и полной спелости» не обнаружено достоверных зависимостей, при этом наблюдалась тенденция ослабления или отклонения корреляций в отрицательную сторону при переходе от фона 1 к фону 2. Исключение составила связь с признаком «продуктивная кустистость», которая свидетельствует о том, что более устойчивые по длине корней генотипы образовывали значимо меньшее число дополнительных побегов в нормальных условиях и большее – в условиях алюмокислого стресса. Между урожайностью и параметром ИДК наблюдали слабую положительную корреляцию в обоих случаях (таблица 2).

Параметр «длина зародышевых корней» достоверно не влиял на признаки, анализируемые в фазу колошения. С ухудшением условий зафиксированы усиление корреляций с длиной флагового листа, а также изменение знака (от слабых отрицательных значений к слабо положительным) по ширине, площади листа и содержание хлорофиллов *A* и *B*. Длина зародышевых корней играла положительную роль в развитии дополнительных побегов в благоприятных условиях и отрицательную – в условиях алюмокислого стресса. Можно констатировать, что большей кустистостью на фоне 1 обладали генотипы с длинными корнями и высокой их пластичностью, а на фоне 2 – генотипы с меньшей длиной корней, но высокой устойчивостью по ИДК. Более тесные корреляции между размером корней у проростков и элементами продуктивности колоса на фоне 2 по сравнению с фоном 1 могут свидетельствовать о возрастающем вкладе корневой системы в продуктивность главного колоса на алюмокислых почвах.

Генотипы, обладающие потенциально более высокой массой 5-дневных проростков, в благоприятных условиях выращивания выделялись по ширине и площади флагового листа, имели меньшую высоту растений и более озерненный колос. Гибриды, сохраняющие высокую биомассу проростков в растворе сульфата алюминия, на кислом участке также имели значительное преимущество по ширине, а также по длине и площади листовой пластинки. При переходе от нормальных условий к стрессовым наблюдали увеличение тесноты связи до положительных достоверных значений между весом проростков, с одной стороны, и параметрами колоса (длина и число колосков), с другой стороны. Корреляция массы проростка с остальными элементами продуктивности (числом зерен, массой зерна с колоса и растения) и урожайностью усиливалась с 0,208–0,307 до 0,402–0,494. Таким образом, оценка генотипов по косвенному признаку «масса проростка» в лабораторном опыте позволяет спрогнозировать их продуктивность по некоторым признакам.

Как видно из таблицы 2, способность к перераспределению биомассы между надземной и подземной частями растений в фазу проростков (индекс RSR) оказывала существенное влияние на элементы продуктивности в гибридных популяциях. Низкие значения RSR в благоприятных условиях были достоверно связаны с увеличением ширины флагового листа и его площади, длины колоса, массы 1000 зерен, снижением доли хлорофилла в светособирающих комплексах (ССК), но не коррелировали с длиной листовой пластинки, высотой растения, продуктивной кустистостью и урожайностью. Пониженные значения RSR при прорастивании в растворе алюминия на высоком уровне значимости согласуются с повышенным содержанием фотосинтетических пигментов, включая каротиноиды, увеличенным размером флаговых листьев, массой зерна с колоса и массой 1000 зерен при выращивании на фоне 2. Отрицательные корреляции индекса RSR были отмечены практически со всеми признаками продуктивности, за исключением продуктивной кустистости.

Анализ корреляционных связей позволил установить, что если ориентировать селекцию на устойчивость к ионам алюминия, следует отбирать те генотипы, которые в

лабораторном опыте на средах с Al^{3+} формируют проросток с высокой массой и длинным корнем, в то же время у которых значительная часть запасных веществ расходуется на развитие надземной части. Отбор по этим признакам, исходя из наших данных, не противоречит отбору на потенциальную продуктивность и будет результативным, поскольку доказана их генотипическая обусловленность на примере гибридных популяций ранних поколений.

При отборах в оптимальных почвенных условиях маркерными признаками кислотоустойчивости можно считать относительно меньшую длину флагового листа и длину стебля, поскольку данные признаки достоверно связаны с устойчивостью (величиной среднего снижения по комплексу изучаемых признаков в системе «фон 2/фон 1»): $r = -0,525^*$ и $r = -0,640^{**}$ соответственно. С ухудшением условий, наоборот, важно обращать внимание на высокие значения указанных ростовых признаков. Объяснить это можно тем, что в неблагоприятных условиях, когда фотосинтез подавлен, относительное участие запасенных в стеблях питательных веществ возрастает до 30–40 % и соломину можно рассматривать не как конкурента за питательные вещества, а как донора, способствующего лучшему наливу зерна. Если проводить полевые отборы на фоне жесткого алюмоокислого стресса, необходимо ориентироваться на высокие значения каждого из указанных в таблице 2 параметров ($r = 0,620^{**}$... $0,865^{**}$), кроме продуктивной кустистости, поскольку все они являются отражением интегрального ответа растительного организма на стрессовое воздействие. Гибриды, формирующие более высокую урожайность на кислом участке, характеризовались минимальным снижением или даже повышением содержания каротиноидов в ответ на стресс ($r = 0,511^*$), поэтому высокие значения каротиноидов могут косвенно свидетельствовать об устойчивости. Корреляция между урожайностью на двух фонах была средняя положительная ($r = 0,417$).

Сравнение двух комбинаций с различной выраженностью признаков в фазе проростков позволило смоделировать ситуацию индивидуального отбора из гибридных популяций. Согласно лабораторному исследованию, гибридная комбинация, образованная от скрещивания потенциально высокоурожайного сорта Баганская 95 и алюмоустойчивого сорта Горноуральская, отличалась относительно более длинным корнем (101–104 % от среднего группового значения всех генотипов), достоверно высокой биомассой проростков в контроле и опыте (115–116 %) и стабильно низким индексом RSR (87–91 %). При полевом изучении на фоне 1 данная гибридная комбинация выделялась по ширине и площади флагового листа (114–115 %), содержанию фотосинтетических пигментов (100–107 %), элементам продуктивности колоса (103–114 %), но имела низкую продуктивную кустистость (74 %). Урожайность в нормальных условиях составила 376,4 г/м² (108 % от среднего значения).

Гибридная популяция, полученная от скрещивания сортов Алтайская 530 и Jasna, в фазу проростков имела меньшую длину корней (91–96% от среднего группового значения), более низкую массу проростков (91–95 %) и самое высокое значение индекса RSR (115–116 %). В бла-

гоприятных условиях выращивания данная комбинация характеризовалась высоким содержанием хлорофиллов *A* и *B* (106–120 %), более узким и длинным листом, большей продуктивной кустистостью (95 %), меньшей массой зерна с колоса и растения (73–88 %) и массой 1000 зерен (90 %). Урожайность была сформирована на уровне среднего в опыте – 342,0 г/м² (99 %).

Как известно, между потенциальной продуктивностью и устойчивостью к неблагоприятным условиям среды существует противоречие: наиболее устойчивые генотипы отличаются меньшей продуктивностью. У исследуемых гибридных популяций отмечена различная стратегия адаптации к стрессу, выраженная в неодинаковой степени снижения или повышения отдельных признаков. За более устойчивый в данном случае принимали тот генотип, у которого отклонение относительных показателей от 100 % (фон 1) было минимальным.

В гибридной комбинации Баганская 95 × Горноуральская в ответ на стресс наблюдали одинаковое снижение массы надземной и подземной частей проростков, в результате их общая масса снизилась на 4,6 % при сохранении значения RSR на прежнем уровне (0,74). В условиях жесткого почвенного стресса данная комбинация сохраняла преимущество по параметрам флагового листа в фазу колошения (снижение на 7–28 %), в меньшей степени снижала количество фотосинтетических пигментов (на 1–38 %), сохраняла стабильность по числу продуктивных стеблей. Однако в фазу полной спелости она сильнее реагировала на стресс снижением признаков продуктивности колоса и растения (на 38–66%). Снижение урожайности по отношению к фону 1 составило 87 %.

В комбинации Алтайская 530 × Jasna под воздействием ионов алюминия повышалась средняя масса ростков (на 3,1 %) и снижалась средняя масса корней (на 3,9 %), соответственно, общая масса проростка не изменялась, а соотношение корень/росток снижалось с 0,99 до 0,93 (на 6,1 %). В условиях полевого эдафического стресса наблюдали сильное снижение уровня всех фотосинтетических пигментов, размеров листовой пластинки (на 30–51 %) в фазу колошения. Реакция по параметрам продуктивности колоса и растения была менее выраженной (снижение на 29–64 %), однако абсолютные значения были ниже, снижение урожайности составило 90 %. По агрономической устойчивости – степени снижения урожайности при воздействии стрессового фактора – обе комбинации были близки к среднему в опыте.

Таким образом, генотип Баганская 95 × Горноуральская, характеризующийся высокой метаболической активностью и силой роста надземной части в период от всходов до колошения, несколько снижает устойчивость к фазе полной спелости. Показано, что зерновая продуктивность обусловлена отложенными в зерне углеводами – продуктами ассимиляции после цветения, а не в результате перераспределения запасных веществ, образовавшихся ранее [19, с. 407]. Можно предположить, что у данного генотипа в начальный период адаптации фотоассимиляты перераспределялись в сторону развития листовой части растений, угнетая рост корней, что в условиях дефицита ресурсов привело к относительному снижению зерновой

продуктивности. Генотип Алтайская 530 × Jasna, характеризующийся более низким темпом синтеза органического вещества, но способный регулировать соотношение корень/побег в стрессовых условиях, предположительно направлял большее количество пластических веществ в корни для поддержания их физиологической активности. Это дало возможность в некоторой степени стабилизировать урожайность, главным образом за счет продуктивности колоса.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

При лабораторном анализе 15 гибридных популяций ранних поколений F_2-F_4 на устойчивость к ионам алюминия не установлено достоверных различий между генотипами по индексу длины корней, большинство изучаемых образцов характеризовались как высоко устойчивые (ИДК = 80...100 %). Высокой генотипической обусловленностью характеризовались показатели: длина зародышевых корней, сухой вес проростков и соотношение масс корней и ростков (root to shoot ratio – RSR), что позволило выделить перспективные комбинации. Наибольшая реакция на условия жесткого эдафического стресса отмечена по урожайности (7,1–16,9 % от нормы в зависимости от комбинации), наименьшая – по содержанию каротиноидов (78,0–111,0 %) и массе 1000 зерен (67,7–89,3 %). Максимальную урожайность в нормальных условиях формировал гибрид Баганская × Jasna, в стрессовых – Тюменская ×

Jasna. Не обнаружено достоверных корреляций между ИДК, длиной зародышевых корней и полевой устойчивостью. Выявлена тенденция усиления корреляций до средних положительных, либо достоверных значений между лабораторными параметрами (длина зародышевых корней, масса проростков) и полевыми параметрами (размеры флаговых листьев, содержание хлорофиллов, элементы продуктивности колоса, урожайность) при ухудшении условий. Способность к перераспределению биомассы в пользу надземной части растений в фазу проростков (индекс RSR) оказывала достоверное положительное влияние на некоторые элементы продуктивности на обоих фонах. Анализ комбинаций Баганская 95 × Горноуральская и Алтайская 530 × Jasna, достоверно различающихся в фазе проростков по биомассе и распределению пластических веществ между корнем и ростком, позволил определить различия по их потенциальной продуктивности и адаптации к стрессу. При селекции на устойчивость к ионам алюминия рекомендуется отбирать генотипы с высокой массой проростка, у которых значительная часть запасных веществ расходуется на развитие надземной части, поскольку эти признаки достаточно тесно коррелируют с данными полевых испытаний. Отбор по данным признакам не противоречит отбору на потенциальную продуктивность и будет результативным, поскольку доказана их генотипическая обусловленность на примере гибридных популяций ранних поколений.

Библиографический список

1. Курина А. Б., Косарева И. А., Артемьева А. М. Генетическое разнообразие *raphanus sativus* l. коллекции вир по аллюмоустойчивости // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. Т. 24. № 6. С. 613–624.
2. Митрофанова Е. М. Кислотоустойчивые сорта полевых культур. Эффективность применения в Предуралье. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 96 с.
3. Жученко А. А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. В трех томах. Москва: Агрорус, 2009. Том II. 1104 с.
4. Марченкова Л. А., Давыдова Н. В., Павлова О. В., Чавдарь Р. Ф., Орлова Т. Г. Оценка селекционного материала яровой мягкой пшеницы на устойчивость к искусственно создаваемым стрессовым ситуациям // Вестник аграрной науки. 2021. № 1 (88). С. 26–32.
5. Ступко В. Ю., Зобова Н. В., Сидоров А. В., Гаевский Н. А. Перспективные способы оценки яровой мягкой пшеницы на чувствительность к эдафическим стрессам // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 10. С. 45–50.
6. Лисицын Е. М. Физиологические параметры корневых систем в селекции зерновых культур на абиотическую устойчивость // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2018. № 3 (15). С. 37–45.
7. Кононенко Н. В., Чабан И. А., Смирнова Е. А., Широких И. Г., Шуплецова О. Н., Баранова Е. Н. Тестирование устойчивости разных форм ячменя (*Hordeum vulgare* L.) к токсическому действию алюминия // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 121–130.
8. Mota L. H. S., Scalon S. P. Q., Dresch D. M., Scalon L. Q., Silva C. J. Gas exchange and antioxidant activity accessions of *Jatropha curcas* L. under aluminium (Al) stress // Australian Journal of Crop Science. 2020. No. 14 (03). Pp. 510–516.
9. Яковлева О. В. Фитотоксичность ионов алюминия // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2018. Т. 179. № 3. С. 315–331.
10. Надежкина Е. В., Тушавина О. В., Вихрева В. А. Изучение действия свинца, кадмия и селена на ранних этапах онтогенеза яровой пшеницы // Агротехнологический вестник. 2018. № 5. С. 43–48.
11. Шапошников А. И., Моргунов А. И., Акин Б., Макарова Н. М., Белимов А. А., Тихонович И. А. Сравнительные характеристики корневых систем и корневой экссудации у синтетического, примитивного и современного сортов пшеницы // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. № 1. С. 68–78.
12. Лисицын Е. М. Методика лабораторной оценки аллюмоустойчивости зерновых культур // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2003. № 3. С. 5–7.
13. Шаманин В. П., Поточкая И. В., Шепелев С. С., Пожерукова В. Е., Моргунов А. И. Морфометрические параметры корневой системы и продуктивность растений у синтетических линий яровой мягкой пшеницы в условиях Западной Сибири в связи с засухоустойчивостью // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 3. С. 587–597.

14. Коробко В. В., Миронова А.Р. Особенности развития корневой системы проростков яровой мягкой пшеницы // Бюллетень Ботанического сада СГУ. 2015. № 13. С. 192–197.
15. Кононенко Н. В., Диловарова Т. А., Канавский Р. В., Лебедев С. В., Баранова Е. Н., Федореева Л. И. Оценка морфологических и биохимических параметров устойчивости различных генотипов пшеницы к хлоридному засолению // Вестник РУДН. Серия: Агротехнологии и животноводство. 2019. Т. 14. № 1. С. 18–39.
16. Амунова О. С., Волкова Л. В., Тиунова Л. Н. Наследование алюмоустойчивости мягкой яровой пшеницы в ювенильный период развития // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 6 (176). С. 10–16.
17. Кильчевский А. В., Хотылева Л. В. Экологическая селекция растений. Минск: Тэхналогія, 1997. 372 с.
18. Osmolovskaya N. G., Dung V. V., Kuchaeva L. The role of organic acids in heavy metal tolerance in plants // Biological Communications. 2018. Vol. 63. No. 1. Pp. 9–16.
19. Образцов А. С. Потенциальная продуктивность культурных растений. Москва: ФГНУ «Роинформагротех», 2001. 504 с.
20. Шевлягина О. Ф., Коробко В. В. Особенности реализации донорно-акцепторных отношений при нарушении целостности зародышевой корневой системы проростка *Triticum aestivum* L. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20. № 2. С. 219–225.
21. Akman H. Cereals have greater root and shoot biomass and less root: shoot ratio than forage legumes // International Journal of Ecosystems and Ecology Science. 2018. Vol. 8. No. 1. Pp. 177–182.
22. Gupta N., Gaurav S., Kumar A.. Molecular Basis of Aluminium Toxicity in Plants: A Review // American Journal of Plant Sciences. 2013. Vol. 4. No. 12. Pp. 21–37.
23. Szabo-Nagy A., Gyimes E., Veha A. Aluminium toxicity in winter wheat. Acta Univ. Sapientiae // Alimentaria. 2015. Vol. 8. Pp. 95–103.
24. Жученко А. А. Мобилизация генетических ресурсов цветковых растений на основе их идентификации и систематизации. Москва, 2012. 584 с.
25. Wojorquez-Quintal E., Escalante C., Martínez-Estevéz M. Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. Pp. 1–18. DOI: 10.3389/fpls.2017.01767.

Об авторах:

Людмила Владиславовна Волкова¹, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ORCID 0000-0002-0837-8425 ; AuthorID 710565; +7 962 894-25-30, volkovkirov@mail.ru

Оксана Сергеевна Амунова¹, кандидат биологических наук, научный сотрудник, ORCID 0000-0001-8560-840X; AuthorID 1017206; +7 953 683 51-71, priemnaya@fanc-sv.ru

Людмила Николаевна Тиунова¹, младший научный сотрудник, ORCID 0000-0003-2219-3926; AuthorID 1105966; priemnaya@fanc-sv.ru

¹ Федеральное аграрное научное учреждение Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого, Киров, Россия

The use of morpho-physiological parameters of spring wheat seedlings in the selection for aluminum resistance

L. V. Volkova¹✉, O. S. Amunova¹, L.N. Tiunova¹

¹ Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitskiy, Kirov, Russia

✉ E-mail: volkovkirov@mail.ru

Abstract. Goal. Determination of the effectiveness of early diagnostic methods for resistance to aluminum ions. 15 hybrid populations of F_2 – F_4 spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.), created with the participation of varieties Altayskaya 530, Bagan-skaya 95, Tyumenskaya 26, Karabalykskaya 98, Gornouralskaya, Lutescens 30, Serebristaya, Jasna were studied. **Methods.** Laboratory assessment for resistance to aluminum ions in the seedling phase; field tests in two points, differing in pH level and content of mobile aluminum ions ($pH_1 = 4.3$; $Al^{3+} = 5.4$ mg/kg of soil; $pH_2 = 3.8$; $Al^{3+} = 211.0$ mg/kg of soil); statistical processing of the results. **Results.** According to the root length index, there were no significant differences between the genotypes, most of the studied samples were characterized as highly resistant (RLI = 80 ... 100 %). The following indicators were characterized by high genotypic indicators: the length of the germ roots, the dry mass of seedlings, the ratio of the root mass to the shoot mass (RSR). The following parameters were characterized by high genotypic conditionality: the length of germinal roots, the dry weight of seedlings, and the ratio of root to shoot weights (RSR). Field stability was assessed by the percentage reduction in signs. The greatest reaction to the conditions of severe edaphic stress was noted in terms of yield (7.1–16.9 % of the norm, depending on the combination), the lowest – in terms of carotenoid content (78.0–111.0 %) and weight of 1000 grains (67.7–89.3 %). No significant correlations were found between RLI, germ root length, and field stability. There was a tendency to increase correlations to average positive or reliable values between laboratory characteristics (length of germ roots, weight of seedlings) and field parameters (size of flag leaves, chlorophyll content, ear productivity elements, yield) during the transi-

tion from background 1 to background 2. The ability to redistribute biomass in favor of the aboveground part of plants in the seedling phase (RSR index) had a significant positive effect on productivity elements on both backgrounds. **Scientific novelty.** Morphophysiological characteristics of seedlings were identified and recommended for selection for resistance to aluminum ions: root length, dry weight of the seedling, RSR index.

Keywords: spring wheat, hybrid populations, seedlings, resistance to aluminum, productivity elements, yield.

For citation: Volkova L. V., Amunova O. S., Tiunova L. N. Ispol'zovaniye morfo-fiziologicheskikh parametrov prorstkov yarovoy pshenitsy v selektsii na alyumoustoychivost' [The use of morphophysiological parameters of spring wheat seedlings in the selection for aluminum resistance] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2021. No. 04 (207). Pp. 24–33. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-24-33. (In Russian.)

Paper submitted: 05.03.2021.

References

1. Kurina A. B., Kosareva I. A., Artemyeva A. M. Geneticheskoe raznoobrazie Raphanus sativus L. kollektzii VIR po alyumoustoychivosti [Genetic diversity of VIR Raphanus sativus L. collections on aluminum tolerance] // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020. Vol. 24. No. 6. Pp. 613–624. (In Russian.)
2. Mitrofanova E. M. Kislotoustoychivyye sorta polevykh kul'tur. Effektivnost' primeneniya v Predural'ye [Acid-resistant varieties of field crops. The effectiveness of the application in the Urals]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 96 p. (In Russian.)
3. Zhuchenko A. A. Adaptivnoye rasteniyevodstvo (ekologo-geneticheskiye osnovy). Teoriya i praktika [Adaptive Plant Production (Ecological & Genetic Backgrounds). Theory and Practice]. Moscow: Agrorus, 2009. Vol. II. 1104 p. (In Russian.)
4. Marchenkova L.A., Davuydova N.V., Pavlova O.V., Chavdar R.F., Orlova T.G. Otsenka selektsionnogo materiala yarovoy myagkoy pshenitsy na ustoychivost' k iskusstvenno sozdavaemym stressovym situatsiyam [Evaluation of soft spring wheat selection material by the artificially-induced stresses resistance] // Bulletin of Agrarian Science. 2021. No. 1 (88). Pp. 26–32. (In Russian.)
5. Stupko V. Yu., Zobova N. V., Sidorov A. V., Gaevskii N. A. Perspektivnye sposoby otsenki yarovoy myagkoy pshenitsy na chuvstvitel'nost' k edaficheskim stressam [Promising methods for assessing spring common wheat for sensitivity to edaphic stress] // Achievements of Science and Technology of AIC. 2019. Vol. 33. No. 10. Pp. 45–50. (In Russian.)
6. Lisitsyn E. M. Fiziologicheskkiye parametry kornevykh sistem v selektsii zernovykh kul'tur na abioticheskuyu ustoychivost' [Physiological traits of root systems in cereal crops breeding for abiotic resistance] // Vestnik of the Mari State University. 2018. No. 3 (15). Pp. 37–45. (In Russian.)
7. Kononenko N. V., Chaban I. A., Smirnova E. A., Shirokikh I. G., Shupletsova O. N., Baranova E. N. Testirovanie ustoychivosti raznykh form yachmenya (Hordeum vulgare L.) k toksicheskomu deystviyu alyuminiya [Testing the stability of different forms of Hordeum vulgare L. to the toxic action of aluminum] // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. Pp. 121–130. (In Russian.)
8. Mota L. H. S., Scalon S. P. Q., Dresch D. M., Scalon L. Q., Silva C. J. Gas exchange and antioxidant activity accessions of Jatropha curcas L. under aluminium (Al) stress // Australian Journal of Crop Science. 2020. No. 14 (03). Pp. 510–516.
9. Yakovleva O. V. Fitotoksichnost' ionov alyuminiya [Phytotoxicity of aluminum ions] // Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2018. Vol. 179. No. 3. Pp. 315–331. (In Russian.)
10. Nadezhkina E. V., Tushavina O. V., Vikhreva V. A. Izucheniye deystviya svintsa, kadmiya i svena na rannikh etapakh ontogeneza yarovoy pshenitsy [The effect of lead, cadmium and selenium on grain crops at early stages of spring wheat ontogeny] // Agrochemical Herald. 2018. No. 5. Pp. 43–48. (In Russian.)
11. Shaposhnikov A. I., Morgounov A. I., Akin B., Makarova N. M., Belimov A. A., Tikhonovich I. A. Sravnitel'nye kharakteristiki kornevykh sistem i kornevoy eksksudatsii u sinteticheskogo, primitivnogo i sovremennogo sortov pshenitsy [Comparative characteristics of root systems and root exudation of synthetic, landrace and modern wheat varieties] // Agricultural Biology. 2016. Vol. 51. No. 1. Pp. 68–78. (In Russian.)
12. Lisitsyn E. M. Metodika laboratornoy otsenki alyumoustoychivosti zernovykh kul'tur [Methods of laboratory assessment of aluminum resistance of grain crops] // Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk. 2003. No. 3. Pp. 5–7. (In Russian.)
13. Shamanin V. P., Pototskaya I. V., Shepelev S. S., Pozherukova V. E., Morgounov A. I. Morfometricheskkiye parametry kornevoy sistemy i produktivnost' rasteniy u sinteticheskikh liniy yarovoy myagkoy pshenitsy v usloviyakh Zapadnoy Sibiri v svyazi s zasukhoustoychivost'yu [Root habitus and plant productivity of spring bread wheat synthetic lines in western siberia, as connected with breeding for drought tolerance] // Agricultural Biology. 2018. Vol. 53. No. 3. Pp. 587–597. (In Russian.)
14. Korobko V. V., Mironova A.R. Osobennosti razvitiya kornevoy sistemy prorstkov yarovoy myagkoy pshenitsy [Features of the development of root system spring wheat seedlings] // Bulletin of Botanic Garden of Saratov State University. 2015. No. 13. Pp. 192–197. (In Russian.)
15. Kononenko N. V., Dilovarova T. A., Kanavsky R. V., Lebedev S. V., Baranova E. N., Fedoreeva L. I. Otsenka morfoloicheskikh i biokhimicheskikh parametrov ustoychivosti razlichnykh genotipov pshenitsy k khloridnomu zasoleniyu [Evaluation

ation of morphological and biochemical resistance parameters to chloride salination in different wheat genotypes] // RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2019. Vol. 14. No. 1. Pp. 18–39. (In Russian.)

16. Amunova O. S., Volkova L. V., Tiunova L. N. Nasledovaniye alyumoustoychivosti myagkoy yarovoy pshenitsy v yuvenil'nyy period razvitiya [Inheritance of aluminum resistance in soft spring wheat during juvenile period of development] // Bulletin of Altai state agricultural University. 2019. No. 6 (176). Pp. 10–16. (In Russian.)

17. Kil'chevskiy A. V., Khotyleva L. V. Ekologicheskaya selektsiya rasteniy [Ecological plant breeding]. Minsk: Tekhnologiya, 1997. 372 p. (In Russian.)

18. Osmolovskaya N. G., Dung V. V., Kuchaeva L. The role of organic acids in heavy metal tolerance in plants // Biological Communications. 2018. Vol. 63. No. 1. Pp. 9–16.

19. Obraztsov A.S. Potentsial'naya produktivnost' kul'turnykh rasteniy [Potential productivity of cultivated plants]. Moscow, 2001. 504 p. (In Russian.)

20. Shevlyagina O. F., Korobko V. V. Osobennosti realizatsii donorno-aktseptornykh otnosheniy pri narushenii tselostnosti zarodyshevoy kornevoy sistemy proroστka Triticum aestivum L. [Some features of implementation of source-sink relations in violation of the integrity of the root system of seedlings of Triticum Aestivum L.] // Izvestiya of Saratov University. New series. Series: Chemistry. Biology. Ecology. 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 219–225. (In Russian.)

21. Akman H. Cereals have greater root and shoot biomass and less root: shoot ratio than forage legumes // International Journal of Ecosystems and Ecology Science. 2018. Vol. 8. No. 1. Pp. 177–182.

22. Gupta N., Gaurav S., Kumar A.. Molecular Basis of Aluminium Toxicity in Plants: A Review // American Journal of Plant Sciences. 2013. Vol. 4. No. 12. Pp. 21–37.

23. Szabo-Nagy A., Gyimes E., Veha A. Aluminium toxicity in winter wheat. Acta Univ. Sapientiae // Alimentaria. 2015. Vol. 8. Pp. 95–103.

24. Zhuchenko A. A. Mobilizatsiya geneticheskikh resursov tsvetkovykh rasteniy na osnove ikh identifikatsii i sistematizatsii [Mobilization of genetic resources of flowering plants of the base of their identification and systematisation]. Moscow, 2012. 584 p. (In Russian.)

25. Bojorquez-Quintal E., Escalante C., Martínez-Estevéz M. Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. Pp. 1–18. DOI: 10.3389/fpls.2017.01767.

Authors' information:

Lyudmila V. Volkova¹, candidate of biological sciences, senior researcher, head of the laboratory, ORCID 0000-0002-0837-8425, AuthorID 710565; +7 962 894-25-30, volkovkirov@mail.ru

Oksana S. Amunova¹, candidate of biological sciences, researcher, ORCID 0000-0001-8560-840X, AuthorID 1017206; +7 953 683 51-71, priemnaya@fanc-sv.ru

Lyudmila N. Tiunova¹, junior researcher; ORCID 0000-0003-2219-3926; priemnaya@fanc-sv.ru

¹ Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitskiy, Kirov, Russia