https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.466-476
УДК: 633.11«321»:631.415.1

# Влияние длительного эдафического стресса на характеристики проростков следующего поколения гибридов яровой пшеницы

**© 2021. Л. В. Волкова✉, М. В. Тулякова**
*ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация*

***Изучен новый генетический материал яровой пшеницы (15 гибридных популяций), созданный в рамках селекции на алюмоустойчивость, в полевых и лабораторных условиях. Исследования гибридов $F_4$ проводили на почвах, различающихся по уровню pH и содержанию подвижных ионов алюминия. Сильный эдафический стресс на фоне 2 (pH 3,8; содержание $Al^{3+}$ = 211 мг/кг почвы) послужил причиной резкого снижения урожайности (на 88,2 %) и признаков продуктивности (на 18,5…63,8 %) по сравнению с фоном 1 (pH 4,3; $Al^{3+}$ = 5,4 мг/кг почвы). Методом лабораторного анализа определяли влияние условий репродукции предыдущего поколения на параметры корневой системы проростков, их биомассу и соотношение «корень/росток» (индекс RSR) в потомствах $F_5$. Семена проращивали в дистиллированной воде (контроль) и водном растворе сульфата алюминия (опыт). Показано, что на вес проростков гораздо сильнее повлияли условия репродукции (среднее снижение на 26,1 %), чем искусственно созданный стресс (снижение на 2,3…4,7 %). Отмечено значимое повышение (на 3,9…16,4 %) лабораторной устойчивости по индексу длины корней (ИДК) у большинства гибридов как адаптивный ответ на длительный эдафический стресс. Рекомендовано учитывать условия вегетации предыдущего поколения, поскольку под их воздействием могут изменяться реакции генотипов по весу проростков, индексу RSR, а также корреляционные отношения между признаками. Выявлены различия генотипов по потенциальному уровню признаков и их стабильности в разных средах. По длине корней выделился гибрид Карабалыкская 98 х Лютесценс 30, по массе проростка – Баганская 95 х Горноуральская. Наибольшей стабильностью по комплексу параметров характеризовался Баганская 95 х Jasna. Гибриды с потенциально более длинным корнем и высокой массой проростков проявляли большую чувствительность к изменению условий среды. Генотипы с преобладанием надземной части в контроле характеризовались более стабильным соотношением «корень/росток».***

**Ключевые слова:** *Triticum aestivum* L., *гибридные популяции, алюмоустойчивость, длина корня, масса проростка, эффекты превегетации*

***Благодарности:*** работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № 0528-2019-0093).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад экспертную оценку данной работы.

***Конфликт интересов***: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования***: Волкова Л. В., Тулякова М. В. Влияние длительного эдафического стресса на характеристики проростков следующего поколения гибридов яровой пшеницы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(4):466-476. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.466-476

Поступила: 10.02.2021 Принята к публикации: 01.07.2021 Опубликована онлайн: 26.08.2021

# The effect of long-term edaphic stress on the characteristics of next generation of spring wheat hybrids seedlings

**© 2021. Lyudmila V. Volkova✉, Marina V. Tulyakova**
*Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation*

***A new genetic material of spring wheat (15 hybrid populations) developed within the breeding work for aluminum resistance, was studied in the field and laboratory conditions. Studies of F4 hybrids were carried out on soils that differ in the pH level and in the content of mobile aluminum ions. Strong edaphic stress on background 2 (pH = 3.8; $Al^{3+}$ content = 211 mg/kg of soil) caused a sharp decrease in yield (by 88.2 %) and productivity traits (by 18.5...63.8 %) compared to background 1 (pH = 4.3; $Al^{3+}$ = 5.4 mg/kg of soil). Laboratory analysis determined the influence of the reproduction conditions of the previous generation on the parameters of the root system of seedlings, their biomass and the root/sprout ratio (RSR index) in the offspring $F_5$. The seeds were germinated in distilled water (control) and an aqueous solution of aluminum sulfate (experiment). It was shown that the weight of seedlings was significantly more strongly influenced by reproduction conditions (an average decrease of 26.1 %) than artificially created stress (a decrease of 2.3...4.7 %). The majority of hybrids showed a significant increase (by 3.9...16.4 %) in laboratory resistance according to the root length index (IDC) as an adaptive response to prolonged edaphic stress. The recommendation is given to take into account the growing conditions of the previous generation, since under their influence the reactions of genotypes by seedling weight, RSR index, as well as correlations between traits can change. The differences of genotypes in the potential level of traits and their stability in different environments were revealed. The hybrid Karabalykskaya 98 x Lutescens 30 differed in the length of the roots, Baganskaya 95 x Gornouralskaya - in the weight of the***

***seedling. The hybrid Baganskaya 95 x Jasna was characterized by the greatest stability according to a set of parameters. Hybrids with potentially longer roots and high seedling mass showed greater sensitivity to changes in environmental conditions. Genotypes with a predominance of the aboveground part in the control were characterized by a more stable "root/sprout" ratio.***

**Key words:** *Triticum aestivum* L., *hybrid populations, aluminum resistance, root length, seedling weight, prevegetation effects*

***Acknowledgment:*** the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No.0528-2019-0093).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

***Conflict of interest*:** the authors stated no conflict of interest.

***For citations:*** Volkova L. V., Tulyakova M.V. The effect of long-term edaphic stress on the characteristics of next generation of spring wheat hybrids seedlings. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(4):466-476. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.466-476

Received: 10.02.2021 Accepted for publication: 01.07.2021 Published online: 26.08.2021

Перед селекционерами ставится стратегическая задача получить сорта, специфично адаптированные к стрессовым условиям окружающей среды, способные обеспечить устойчивое производство сельскохозяйственной продукции [1]. Адаптивный сорт – это сорт, приспособленный не только к оптимуму, но и к минимуму, и максимуму внешних факторов среды. В дерново-подзолистых и серых лесных почвах северных зон на урожайность негативно влияет кислый почвенный фон с высоким содержанием подвижных ионов алюминия и недостаток питательных веществ [2].

В ходе селекционного процесса исходный материал (гибриды, линии, сортообразцы) испытывают под воздействием различных стрессоров для выявления наиболее устойчивых генотипов. Изучение нового генетического материала рекомендуется проводить на репрезентативных выборках, в разных экологических пунктах [3], однако такие методы являются многолетними и дорогостоящими. Лабораторная оценка в фазе проростков позволяет за короткое время выявить генотипические различия и сократить затраты на исследования. Изучение гибридов ранних поколений особенно актуально, поскольку определение их устойчивости к ионной токсичности $Al^{3+}$ на начальных этапах селекции позволяет выделить перспективные комбинации и значительно сократить объем работы. Н. А. Лыковой предложен принцип ускоренного испытания генотипов, который основан на изучении образцов при искусственно созданных градиентах среды (от оптимального к минимальному и максимальному значениям фактора) и позволяет в течение одного-двух лет получать их объективные характеристики как по физиологическим признакам, так и по устойчивости к биотическим и абиотическим факторам [4].

Для объективной оценки генотипов необходимо учитывать и экологические последействия, которые могут весьма существенно влиять на развитие растений следующего поколения [5]. Эффект материнского генотипа и среды проявляется в изменении количественных показателей жизнеспособности семян вследствие обеспечения семени питательными ресурсами, транскриптами мРНК, белком, гормонами во время его развития [6, 7]. Некоторые исследователи считают, что регулярно повторяющиеся факторы окружающей среды и реакции организма на них запоминаются и эпигенетически программируются в виде адаптивного ответа, проявление которого связано с многочисленными физиологическими и биохимическими реакциями, но без изменений в структуре ДНК [8]. Как пример, можно назвать метилирование повторяющихся последовательностей генома и формирование новой структуры хроматина, перепрограммирующей экспрессию множества генов в клетках адаптированных растений [9, 10]. Такое воздействие специфических сигналов на организм в процессе его онтогенеза указывается в качестве перспективного приема для селекции [11].

Структура адаптивных реакций растений весьма сложная, состоит из множества воспринимающих, трансформирующих и передающих сигнал элементов. Выделение элементов этой системы далеко до завершения, не все рецепторы описаны, мало сведений о механизмах их регуляции внутри клеток. У разных генотипов адаптация к одному и тому же типу стресса может осуществляться различными функциональными путями. В данной работе сделана попытка установить закономерности адаптивной реакции генотипов на феноменологическом (организменном) уровне, не затрагивая молекулярно-клеточные процессы. На примере уникальных гибридных популяций впервые изучено влияние полевого эдафического стресса на результаты лабораторного испытания генотипов последующего поколения.

***Цель исследований*** – установить закономерности изменения морфологических параметров проростков в гибридных популяциях и их устойчивость к ионам алюминия в зависимости от экологических условий формирования предыдущего поколения, выделить перспективные гибриды.

***Материал и методы.*** Изучали 15 гибридных популяций в двух поколениях ($F_4$ и $F_5$), полученных от скрещивания контрастных сортов: Алтайская 530, Баганская 95, Тюменская 26, Карабалыкская 98 (высокопродуктивные материнские формы); Горноуральская, Лютесценс 30, Серебристая, Jasna (алюмоустойчивые отцовские формы).

Исследования проводили в 2020 г. (поколение $F_4$) в полевых условиях на делянках 4,5 м$^2$, в двух пунктах испытаний: ФАНЦ Северо-Востока (г. Киров) и Фалёнская селекционная станция (п. Фалёнки, Кировская обл.). Почва дерново-подзолистая среднесуглинистая, различающаяся по уровню pH и содержанию подвижных ионов алюминия. Метеорологические условия в пунктах испытания гибридов отличались по уровню влагообеспеченности (табл. 1).

*Таблица 1* – **Агрохимическая характеристика почвы и метеорологические условия за вегетационный период 2020 г. /**
*Table 1* – **Agrochemical characteristics of the soil and meteorological conditions for the growing season of 2020**

| *Содержание в почве / Content in the soil* | | | *Среднесуточная температура воздуха / Average daily air temperature* | *Сумма осадков / Precipitation amount* | *Гидротермический коэффициент / Hydrothermal coefficient* |
|---|---|---|---|---|---|
| $pH_{KCl}$ | $Al^{3+}$, *мг/кг* / $Al^{3+}$, *mg/kg* | *Гумус, %* / *Humus, %* | *% к норме / % to normal* | | |
| Фон 1 (Киров) / Background 1 (Kirov) | | | | | |
| 4,30 | 5,4 | 2,02 | 100 | 104 | 2,2 |
| Фон 2 (Фаленки) / Background 2 (Falenki) | | | | | |
| 3,81 | 211,0 | 2,02 | 100 | 78 | 1,9 |

В 2021 г. в лабораторных условиях определяли устойчивость данных популяций к ионам алюминия в фазу проростков по методике Е. М. Лисицына [12]. Семена проращивали в течение 5 дней в дистиллированной воде (контроль) и водном растворе сульфата алюминия концентрацией 1,5 мМоль/л (опыт). Выборка семян из каждой гибридной популяции составляла 150 штук. По окончании опыта у проростков измеряли среднюю длину корня, среднюю биомассу проростка и соотношение между массой корней и ростков (индекс RSR). Индекс длины корней (ИДК) определяли как отношение средней длины корней в опыте к контролю в процентах. Влияние условий репродукции поколения $F_4$ на устойчивость к ионам алюминия потомств $F_5$ оценивали по изменению процентного соотношения параметров в контроле и опыте. Статистическую обработку результатов проводили с помощью двухфакторного дисперсионного анализа[1]. Коэффициенты фенотипической корреляции между признаками рассчитывали при численности выборки n = 15, считая достоверными значения r ≥0,51 и r ≥0,59 соответственно при 5 и 1%-ом уровнях значимости.

***Результаты и их обсуждение.*** Критический предел содержания алюминия в почве, снижающий урожайность яровой пшеницы на 50…100 %, составляет 100…120 мг/кг почвы [3]. Наиболее высокая токсичность алюминия проявляется при pH ниже 4,0 [13]. Как видно из данных таблицы 1, предельная концентрация алюминия в почве Фаленской селекционной станции превышена в 2 раза. Высокий уровень стресса и продолжительность его воздействия (весь вегетационный период) подтверждается значительным снижением уровня продуктивности растений (табл. 2).

При диагностике устойчивости генотипов в ювенильную фазу используют характеристики корневых систем, подвергнутых неблагоприятному воздействию алюминия в питательной среде, в сравнении с контрольными значениями. К диагностическим критериям можно отнести также ростовые параметры [14]. Лабораторная оценка гибридов $F_5$ пшеницы включала учет физиологических характеристик (длина корня, ИДК, масса проростка, индекс RSR) у семян, репродуцированных в условиях благоприятных и жесткого эдафического стресса.

[1]Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.

*Таблица 2* – **Влияние экологических условий роста и развития растений яровой пшеницы гибридных поколений $F_4$ на основные признаки продуктивности (2020 г.) /**
*Table 2* – **Influence of ecological conditions of growth and development of spring wheat plants of hybrid generations $F_4$ on the main traits of productivity (2020)**

| *Признак продуктивности / A trait of productivity* | *Фон 1 / Background 1* | | *Фон 2 / Background 2* | | *% снижения / % reduction* |
|---|---|---|---|---|---|
| | *среднее значение, n = 15 / average value* | *размах изменчивости / the magnitude of variability* | *среднее значение, n = 15 / average value* | *размах изменчивости / the magnitude of variability* | |
| Высота растений, см / Plant height, cm | 85,6 | 79,2…95,1 | 46,2 | 37,9…56,5 | 46,0 |
| Длина колоса, см / The length of the ear, cm | 7,5 | 6,6…8,5 | 5,3 | 3,9…6,6 | 29,3 |
| Число зерен в колосе, шт. / The number of grains, per ear | 28,5 | 24,6…34,2 | 14,8 | 8,5…2,4 | 48,1 |
| Масса зерна с колоса, г / Weight of grain per ear, g | 1,08 | 0,84…1,42 | 0,47 | 0,23…0,75 | 56,5 |
| Масса зерна с растения, г / Grain weight per plant, g | 1,30 | 0,86…1,83 | 0,47 | 0,24…0,75 | 63,8 |
| Масса 1000 зерен, г / 1000 grain mass, g | 37,9 | 31,6…41,4 | 30,9 | 27,0…36,8 | 18,5 |
| Урожайность, г/м$^2$ / Yield, g/m$^2$ | 347,8 | 287,3…430,0 | 40,9 | 26,1…58,8 | 88,2 |

Примечания: фон 1 – pH 4,3; $Al^{3+}$ = 5,4 мг/кг почвы; фон 2 – pH 3,8; $Al^{3+}$ = 211 мг/кг почвы /
Notes: background 1 – pH 4.3; $Al^{3+}$ = 5.4 mg/kg of soil; background 2 – pH 3.8; $Al^{3+}$ = 211 mg/kg of soil.

По контрольным значениям признаков у гибридов, выращенных в благоприятных условиях, можно судить о потенциальном уровне развития признаков. Достоверно высокие значения длины корней в контроле (фон 1) отмечены в пяти гибридных комбинациях, одна из них – Карабалыкская 98 х Лютесценс 30 подтвердила свое преимущество в контроле (фон 2). Условия проращивания значимо повлияли на длину корней у всех комбинаций, значения в опыте снижались в среднем на 2,2 см (18,8 %) на фоне 1, $НСР_{05}$(В) = 0,1 см и на 1,3 см (13,5 %) на фоне 2, $НСР_{05}$(В) = 0,2 см. Развитие растений $F_4$ в условиях сильного эдафического стресса также оказало отрицательное влияние на длину корней проростков поколения $F_5$. Снижение средних величин в контроле (с 11,5 до 9,7 см) составило 15,6 %. Реакция на условия превегетации по длине корней у отдельных генотипов оказалась неодинаковой – минимальным снижением характеризовался гибрид Алтайская 530 х Серебристая (на 1,9 %), максимальным – Карабалыкская 98 х Jasna (на 25,0 %) (табл. 3).

Вместе с тем, судя по средней величине ИДК, лабораторная устойчивость у семян, сформированных в условиях жесткого алюмокислого стресса, оказалась выше на 5,3 %. Десять комбинаций достоверно повысили величину ИДК на 3,9…16,4 %. Максимальный адаптивный ответ по устойчивости показал гибрид Баганская 95 х Серебристая, у которого значение ИДК возросло с 78,8 до 95,5 %. Пять гибридных популяции не отреагировали или незначительно снизили устойчивость: Алтайская 530 х Jasna, Алтайская 530 х Серебристая, Карабалыкская 98 х Горноуральская, Тюменская 26 х Jasna; Тюменская 26 х Серебристая. Необходимо отметить, что исходные формы Карабалыкская 98 и Jasna в $F_2$ были выделены по общей комбинационной способности длины корней, Алтайская 530 и Горноуральская – по общей комбинационной способности ИДК [15].

Коэффициент вариации отражает норму реакции генотипов в разных градиентах среды. В нашем случае максимальный уровень признака растения формировали в варианте «фон 1/контроль», минимальный – «фон 2/опыт». Вариабельность изучаемых образцов по длине корней составляла 7,9…17,6 %, наиболее стабильными были Алтайская 530 х Горноуральская, Алтайская 530 х Серебристая и Баганская 95 х Jasna. Значения длины корня у проростков, не подвергшихся стрессовому

воздействию, тесно коррелировали с вариабельностью признака в четырех вариантах лабораторного опыта (r = 0,80), т. е. гибриды с потенциально более длинным корнем обладали меньшей стабильностью, что затрудняет селекцию на сочетание этих параметров.

*Таблица 3* – **Влияние экологических условий роста и развития растений яровой пшеницы гибридных поколений $F_4$ на длину корня проростков поколения $F_5$ в лабораторном опыте на алюмоустойчивость (2021 г.) /**
*Table 3* – **Influence of ecological conditions of growth and development of spring wheat plants of hybrid generations $F_4$ on the root length of seedlings in $F_5$ in the laboratory experiment for aluminum resistance (2021)**

| *Гибридная популяция / Hybrid population* | *Фон 1 / Background 1* | | *Фон 2 / Background 2* | | *CV, %* |
|---|---|---|---|---|---|
| | *длина корня в контроле, см / root length in control, cm* | *ИДК, % / RLI, %* | *длина корня в контроле, см / root length in control, cm* | *ИДК, % / RLI, %* | |
| Алтайская 530 х Лютесценс 30 / Altayskaya 530 x Lutescens 30 | 10,6 | 82,8 | 8,4 | 91,4 | 12,4 |
| Алтайская 530 х Jasna / Altayskaya 530 x Jasna | 10,8 | 83,6 | 10,5 | 83,2 | 9,1 |
| Алтайская 530 х Горноуральская / Altayskaya 530 x Gornouralskaya | 9,7 | 83,5 | 9,2 | 87,9 | 7,9 |
| Алтайская 530 х Серебристая / Altayskaya 530 x Serebristaya | 10,5 | 84,6 | 10,3* | 85,0 | 8,3 |
| Баганская 95 х Лютесценс 30 / Baganskaya 95 x Lutescens 30 | 11,3 | 79,0 | 9,6 | 89,4 | 10,9 |
| Баганская 95 х Jasna / Baganskaya 95 x Jasna | 11,0 | 82,7 | 9,8 | 91,4 | 8,3 |
| Баганская 95 х Горноуральская / Baganskaya 95 x Gornouralskaya | 11,3 | 82,9 | 9,7 | 91,7 | 9,0 |
| Баганская 95 х Серебристая / Baganskaya 95 x Serebristaya | 11,7 | 78,8 | 9,6 | 95,5 | 10,5 |
| Карабалыкская 98 х Лютесценс 30 / Karabalykskaya 98 x Lutescens 30 | 12,6* | 77,8 | 10,2* | 82,9 | 14,8 |
| Карабалыкская 98 х Jasna / Karabalykskaya 98 x Jasna | 12,1* | 72,6 | 9,0 | 85,1 | 17,6 |
| Карабалыкская 98 х Горноуральская / Karabalykskaya 98 x Gornouralskaya | 11,5 | 84,2 | 9,4 | 82,3 | 13,9 |
| Карабалыкская 98 х Серебристая / Karabalykskaya 98 x Serebristaya | 12,9* | 81,0 | 10,1 | 85,0 | 14,6 |
| Тюменская 26 х Лютесценс 30 / Tyumenskaya 26 x Lutescens 30 | 12,0* | 80,7 | 9,1 | 85,7 | 15,7 |
| Тюменская 26 х Jasna / Tyumenskaya 26 x Jasna | 11,7 | 84,7 | 10,3* | 81,2 | 11,8 |
| Тюменская 26 х Серебристая / Tyumenskaya 26 x Serebristaya | 12,6* | 78,9 | 9,9 | 77,7 | 17,2 |
| **Среднее (n = 15) / Average (n = 15)** | **11,5** | **81,2** | **9,7** | **86,5** | **12,1** |
| $НСР_{05}$ (А – генотип) / $LSD_{05}$ (A – genotype) | 0,4 | - | 0,5 | - | - |
| $НСР_{05}$(В – условия проращивания) / $LSD_{05}$ (B – germination conditions) | 0,1 | - | 0,2 | - | - |

Примечания: фон 1 – pH 4,3; $Al^{3+}$ = 5,4 мг/кг почвы; фон 2 – pH 3,8; $Al^{3+}$ = 211 мг/кг почвы;
* – значимое превышение над средним популяционным значением (n = 15) /
Notes: background 1 – pH 4.3; $Al^{3+}$ = 5.4 mg/kg of soil; background 2 – pH 3.8; $Al^{3+}$ = 211 mg/kg of soil;
* – significant excess over the average value (n = 15).

Морфофизиологический анализ проростков может быть использован для оценки потенциальной продуктивности растений. Предыдущие исследования показали, что сорта с более мощными побегами в ювенильную фазу характеризовались более высокими значениями элементов структуры продуктивности в фазу полной спелости [16]. Предполагается, что вес проростков зависит от размера зерна и его химического состава и предопределяется не только генотипом, но и условиями репродуктивного этапа развития материнских растений. В нашем опыте крупность семян в слабой степени влияла на ростовые показатели (длина корней, масса проростков) в контрольных условиях (r = 0,28…0,39). При проращивании в водном растворе алюминия связь крупности зерна с массой проростков возрастала (r = 0,51…0,67), с длиной корней была непостоянной (r = 0,15…0,56).

Достоверно высокую массу проростков в контроле (фон 1) формировал гибрид «Баганская 95 х Горноуральская», в контроле (фон 2) – «Тюменская 26 х Jasna». Длительный эдафический стресс в полевых условиях повлиял на массу проростков следующего поколения растений гораздо сильнее – среднее снижение на 2,24 мг (26,1 %), чем искусственно созданный стресс в ювенильную фазу их развития – снижение на 0,42 мг (4,7 %) – фон 1, $НСР_{05}$ = 0,24, на 0,15 мг (2,3 %) – фон 2 (различия не значимы). Более всего эффект превегетации был выражен в гибридной комбинации Карабалыкская 98 х Jasna (снижение на 37,8 %), самой устойчивой оказалась комбинация Тюменская 26 х Jasna (снижение на 9,4 %). В целом надо отметить, что по весу проростков наблюдали более широкий размах нормы реакции отдельных генотипов (CV = 6,6…20,3 %), чем по длине корней, что можно использовать в практической селекции для отбора устойчивых форм (табл. 4). Величина признака и его вариабельность положительно связаны (r = 0,43).

Адаптация к стрессу считается более эффективной, если в растении реализуется сразу несколько приспособительных реакций, однако одновременное их включение ограничивается энергетическими возможностями растений и обостряет проблему распределения ресурсов. Одной из наиболее важных ростовых адаптаций к видам эдафического (почвенного) стресса считают перераспределение биомассы между надземной и подземной частями растений (индекс RSR = масса корня/масса ростка). Такое распределение видо- и сортоспецифично и зависит от интенсивности внешнего влияния [17].

Семена, сформированные в оптимальных условиях, при прорастании значительную часть запасных веществ расходуют на развитие ростка [18]. Контрольные значения RSR большинства гибридов с фона 1 согласуются с этим утверждением, за исключением трех комбинаций, отцовской формой которых служил сорт Jasna. При переходе от контроля к опыту на фоне 1 наблюдали общую тенденцию к снижению RSR в среднем на 0,05, или 5,7 %, $НСР_{05}$ (В) = 0,03, что свидетельствует об ингибировании роста корневой системы в растворе алюминия. Однако отдельные гибриды демонстрировали повышение RSR в ответ на стресс: Алтайская 530 х Лютесценс 30 и Алтайская 530 х Серебристая, Баганская 95 х Горноуральская (табл. 5).

Несколько иную реакцию по RSR показали образцы, полученные на фоне 2, у которых средние групповые значения в контроле и опыте практически не изменились (различия по фактору В не значимы), но четыре гибрида показали повышение RSR на 10 % и более: Алтайская 530 х Лютесценс 30, Баганская 95 х Лютесценс 30, Баганская 95 х Серебристая, Карабалыкская 98 х Лютесценс 30. Активацию роста корней у данных генотипов можно объяснить включением регуляторных механизмов, распределяющих ресурсы в пользу органа, обеспечивающего поглощение.

Если сравнивать контрольные варианты фона 1 и фона 2, то можно констатировать, что общее снижение RSR составило 15,9 %, т. е. эффекты среды и материнского генотипа больше повлияли на развитие корневой системы (масса зародышевых корней в среднем снизилась на 26,7 %), чем на величину надземной части (масса побега в среднем снизилась на 19,5 %). Вариабельность признака в разных средах у генотипов изменялась в пределах 2,2…13,7 %. Значения RSR в норме и его вариабельность при разных уровнях стресса положительно связаны между собой (r = 0,69), т. е. генотипы с преобладанием надземной части, как правило, слабее реагировали на изменение условий. Примером тому может служить гибридная популяция №7 Баганская 95 х Горноуральская с максимальной массой проростка в контроле, самыми низкими значениями RSR и CV, %.

*Таблица 4* – **Влияние экологических условий роста и развития растений яровой пшеницы гибридного поколения $F_4$ на массу проростков поколения $F_5$ в лабораторном опыте на алюмоустойчивость (2021 г.)** / *Table 4* – **Influence of ecological conditions of growth and development of spring wheat plants of hybrid generation $F_4$ on the weight of seedlings in $F_5$ in the laboratory experiment for aluminum resistance (2021)**

| *Гибридная популяция/ Hybrid population* | *Фон 1 / Background 1* | | *Фон 2 / Background 2* | | *CV, %* |
|---|---|---|---|---|---|
| | *вес проростков / weight of seedlings* | | | | |
| | *в контроле, мг / in the control, mg* | *% к контролю / % to control* | *в контроле, мг / in the control, mg* | *% к контролю / % to control* | |
| Алтайская 530 х Лютесценс 30 / Altayskaya 530 x Lutescens 30 | 7,72 | 102,3 | 5,84 | 85,3 | 18,7 |
| Алтайская 530 х Jasna / Altayskaya 530 x Jasna | 7,87 | 95,8 | 6,54 | 93,9 | 10,0 |
| Алтайская 530 х Горноуральская / Altayskaya 530 x Gornouralskaya | 7,97 | 98,9 | 6,44 | 89,9 | 13,3 |
| Алтайская 530 х Серебристая / Altayskaya 530 x Serebristaya | 8,17 | 102,0 | 6,69 | 86,5 | 14,5 |
| Баганская 95 х Лютесценс 30 / Baganskaya 95 x Lutescens 30 | 8,94 | 97,2 | 6,24 | 115,1 | 14,2 |
| Баганская 95 х Jasna / Baganskaya 95 x Jasna | 8,77 | 97,3 | 6,47 | 107,0 | 12,9 |
| Баганская 95 х Горноуральская / Baganskaya 95 x Gornouralskaya | 10,34* | 90,8 | 6,64 | 96,1 | 20,9 |
| Баганская 95 х Серебристая / Baganskaya 95 x Serebristaya | 8,77 | 86,0 | 6,48 | 91,8 | 15,0 |
| Карабалыкская 98 х Лютесценс 30 / Karabalykskaya 98 x Lutescens 30 | 8,61 | 95,4 | 6,69 | 90,6 | 14,2 |
| Карабалыкская 98 х Jasna / Karabalykskaya 98 x Jasna | 8,83 | 81,0 | 5,49 | 100,9 | 20,3 |
| Карабалыкская 98 х Горноуральская / Karabalykskaya 98 x Gornouralskaya | 8,30 | 101,3 | 5,80 | 105,0 | 16,9 |
| Карабалыкская 98 х Серебристая / Karabalykskaya 98 x Serebristaya | 9,13 | 94,8 | 6,48 | 109,4 | 13,9 |
| Тюменская 26 х Лютесценс 30 / Tyumenskaya 26 x Lutescens 30 | 8,97 | 90,8 | 6,31 | 99,4 | 15,7 |
| Тюменская 26 х Jasna / Tyumenskaya 26 x Jasna | 8,18 | 104,3 | 7,41* | 98,1 | 6,6 |
| Тюменская 26 х Серебристая / Tyumenskaya 26 x Serebristaya | 8,28 | 92,0 | 5,77 | 96,4 | 17,2 |
| **Среднее (n = 15) / Average (n = 15)** | **8,59** | **95,3** | **6,35** | **97,7** | **15,0** |
| $НСР_{05}$ (А – генотип) / $LSD_{05}$ (A – genotype) | 0,66 | - | 0,50 | - | - |
| $НСР_{05}$ (В – условия проращивания) / $LSD_{05}$ (B – germination conditions) | 0,24 | - | - | - | - |

Примечания: фон 1 – pH 4,3; $Al^{3+}$ = 5,4 мг/кг почвы; фон 2 – pH 3,8; $Al^{3+}$ = 211 мг/кг почвы;
* – значимое превышение над средним популяционным значением (n = 15) /
Notes: background 1 – pH 4.3; $Al^{3+}$ = 5.4 mg/kg of soil; background 2 – pH 3.8;
$Al^{3+}$ = 211 mg/kg of soil; * – significant excess over the average value (n = 15).

У растений как контрольного, так и опытного варианта, предыдущее поколение которых росло в благоприятных условиях (фон 1), параметр RSR не коррелировал с длиной зародышевых корней (r = 0,06…-0,18), но был отрицательно связан с весом проростков (r = -0,38…-0,66). Это значит, что у генотипов с более длинным корнем его масса не всегда преобладала над массой побега, а те генотипы, которые формировали высокую общую биомассу проростков, большую часть пластических веществ направляли в надземную часть.

*Таблица 5* – **Влияние экологических условий роста и развития растений яровой пшеницы гибридного поколения $F_4$ на показатель RSR поколения $F_5$ в лабораторном опыте на алюмоустойчивость (2021 г.)** / *Table 5* – **Influence of ecological conditions of growth and development of spring wheat plants of the hybrid generation $F_4$ on the RSR index in $F_5$ in the laboratory experiment on aluminum resistance (2021)**

| *Гибридная популяция / Hybrid population* | *1 фон / Background 1* | | *2 фон / Background 2* | | *CV, %* |
|---|---|---|---|---|---|
| | *индекс RSR* | | | | |
| | *в контроле / in control* | *% к контролю / % to control* | *в контроле / in control* | *% к контролю / % to control* | |
| Алтайская 530 x Лютесценс 30 / Altayskaya 530 x Lutescens 30 | 0,91 | 107,7 | 0,69 | 111,6 | 13,7 |
| Алтайская 530 x Jasna / Altayskaya 530 x Jasna | 1,07* | 90,0 | 0,85* | 102,4 | 9,4 |
| Алтайская 530 x Горноуральская / Altayskaya 530 x Gornouralskaya | 0,82 | 96,3 | 0,70 | 104,3 | 6,3 |
| Алтайская 530 x Серебристая / Altayskaya 530 x Serebristaya | 0,86 | 109,3 | 0,79* | 97,5 | 8,1 |
| Баганская 95 x Лютесценс 30 / Baganskaya 95 x Lutescens 30 | 0,86 | 88,4 | 0,77 | 114,3 | 6,8 |
| Баганская 95 x Jasna / Baganskaya 95 x Jasna | 0,84 | 94,1 | 0,82* | 90,2 | 4,6 |
| Баганская 95 x Горноуральская / Baganskaya 95 x Gornouralskaya | 0,68 | 103,0 | 0,71 | 101,4 | 2,2 |
| Баганская 95 x Серебристая / Baganskaya 95 x Serebristaya | 0,85 | 91,8 | 0,69 | 110,1 | 7,5 |
| Карабалыкская 98 x Лютесценс 30 / Karabalykskaya 98 x Lutescens 30 | 0,90 | 90,0 | 0,67 | 117,9 | 10,5 |
| Карабалыкская 98 x Jasna / Karabalykskaya 98 x Jasna | 0,96* | 81,2 | 0,71 | 98,6 | 12,9 |
| Карабалыкская 98 x Горноуральская / Karabalykskaya 98 x Gornouralskaya | 0,85 | 95,3 | 0,68 | 95,6 | 11,2 |
| Карабалыкская 98 x Серебристая / Karabalykskaya 98 x Serebristaya | 0,87 | 90,8 | 0,76 | 98,7 | 5,6 |
| Тюменская 26 x Лютесценс 30 / Tyumenskaya 26 x Lutescens 30 | 0,87 | 94,3 | 0,72 | 95,8 | 9,1 |
| Тюменская 26 x Jasna / Tyumenskaya 26 x Jasna | 0,99* | 87,9 | 0,74 | 95,9 | 13,2 |
| Тюменская 26 x Серебристая / Tyumenskaya 26 x Serebristaya | 0,88 | 94,3 | 0,76 | 86,8 | 10,5 |
| **Среднее (n = 15) / Average (n = 15)** | **0,88** | **94,3** | **0,74** | **101,4** | **8,8** |
| $НСР_{05}$ (А – генотип) / $LSD_{05}$ (A – genotype) | 0,08 | - | 0,05 | - | - |
| $НСР_{05}$(В – условия проращивания) / $LSD_{05}$ (B – germination conditions) | 0,03 | - | - | - | - |

Примечания: фон 1 – pH 4,3; $Al^{3+}$ = 5,4 мг/кг почвы; фон 2 – pH 3,8; $Al^{3+}$ = 211 мг/кг почвы;
* – значимое превышение над средним популяционным значением (n = 15) /
Notes: background 1 – pH 4.3; $Al^{3+}$ = 5.4 mg/kg of soil; background 2 – pH 3.8; $Al^{3+}$ = 211 mg/kg of soil;
* – significant excess over the average value (n = 15).

У гибридов, предыдущее поколение которых выращивалось в условиях жесткого почвенного стресса (фон 2), индекс RSR значимо коррелировал с длиной корней (r = 0,51…0,55), но был слабо положительно связан с общим весом проростков (r = 0,20…0,23). В этом случае запасы питательных веществ перераспределялись в корневую систему, а увеличение длины и веса корней повлекло за собой уменьшение относительного веса ростков. Ингибирование роста побега можно объяснить ограниченностью ресурсов для поддержания ростовых процессов и влиянием фитогормонов [19]. Таким образом, условия репродукции в гораздо большей степени, чем условия лабораторного опыта, влияли на корреляционные отношения между признаками.

Определенный интерес для селекции представляют знания об изменении вклада генотипа и среды на признаки в случаях, когда условия репродукции материнских растений значительно различаются. Вне зависимости от фона, вклад генотипа в признак «длина корня» получен на уровне 26,0…26,6 %, условия лабораторного опыта оказывали большее воздействие (53,0…66,1 %) (табл. 6). Влияние генотипа на массу проростка и индекс RSR было существенным (45,1…54,8 %), однако влияние условий опыта при переходе от благоприятных условий превегетации к стрессовым снизилось до недостоверных значений. Таким образом, при лабораторном анализе алюмоустойчивости важно учитывать те условия, при которых были сформированы семена, поскольку жесткий эдафический стресс, испытываемый предыдущим поколением, может снижать реакцию генотипов по весу проростков и индексу RSR.

*Таблица 6* – **Влияние генотипа (фактор А) и условий лабораторного опыта (фактор В) на параметры проростков в зависимости от условий репродукции (фон 1, 2) предыдущего поколения, % /**
*Table 6* – **Influence of the genotype (factor A) and the conditions of laboratory experiment (factor B) on the parameters of seedlings depending on the conditions of reproduction (background 1, 2) of the previous generation, %**

| *Источник варьирования/ Source of changeability* | *Длина корня / Root length* | | *Вес проростков / Weight of seedlings* | | *Индекс RSR / RSR Index* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *1* | *2* | *1* | *2* | *1* | *2* |
| Вариант опыта / Variant of the experiment | 95,9* | 82,9* | 64,6* | 71,7* | 67,1* | 68,9* |
| Блок / Block | 0,1 | 0,9 | 1,1 | 0,7 | 2,1 | 2,2 |
| Фактор А / Factor A | 26,6* | 26,0* | 45,1* | 54,8* | 50,0* | 48,9* |
| Фактор В / Factor B | 66,1* | 50,3* | 7,3* | 1,3 | 6,5* | 0,4 |
| Взамодействие АхВ / Interaction AxB | 3,2* | 6,6 | 12,2 | 15,6* | 10,6 | 19,6* |
| Случайные отклонения / Random deviations | 4,0 | 16,2 | 34,3 | 27,6 | 30,8 | 28,9 |

Примечания: 1 – фон 1; 2 – фон 2; * – значимо при $p \leq 0,05$ /
Notes: 1 – background 1; 2 – background 2; * – significant at $p \leq 0.05$

***Выводы.*** Испытания нового генетического материала яровой пшеницы, созданного в рамках селекции на алюмоустойчивость, в фазу проростков в различных градиентах среды, позволило установить некоторые закономерности физиологических реакций на условия превегетации и выделить устойчивые генотипы. Выращивание гибридных популяций на фоне с повышенной кислотностью и высоким содержанием подвижных ионов алюминия в почве привело к существенному снижению их продуктивности, а также к изменению морфологических параметров проростков последующего поколения. Экологическое последействие повлияло на массу проростков гораздо сильнее, чем искусственно созданный стресс в ювенильную фазу их развития. Отмечено значимое повышение лабораторной устойчивости по длине корней (ИДК) у большинства гибридов, как адаптивный ответ на длительный эдафический стресс. При лабораторном анализе алюмоустойчивости важно учитывать условия вегетации предыдущего поколения, поскольку под их влиянием могут изменяться реакции генотипов по весу проростков, индексу RSR, а также корреляционные отношения между признаками. В целевой селекции на устойчивость предлагается определять степень реакции на стресс не только у материнских растений, но и у проростков следующего поколения.

Выявлены различия генотипов по потенциальному уровню признаков и устойчивости к ионам алюминия. По длине корня выделялась гибридная популяция Карабалыкская 98 х Лютесценс 30, по стабильности ИДК – Алтайская 530 х Серебристая. Максимальную реакцию на стресс повышением ИДК показал гибрид Баганская 95 х Серебристая. По массе проростка в контроле преимущество имел Баганская 95 х Горноуральская, отличающийся также самой высокой стабильностью по RSR. Наименьшей изменчивостью по комплексу изученных параметров характеризовался Баганская 95 х Jasna, наибольшей – Карабалыкская 98 х Jasna. Гибриды с потенциально более длинным корнем и массой проростков обладали меньшей стабильностью. Генотипы с преобладанием надземной части в контроле характеризовались более стабильным соотношением «корень/росток» при изменении условий.

***Список литературы***

1. Чесноков Ю. В., Косолапов В. М. Генетические ресурсы растений и ускорение селекционного процесса. М.: ООО «Угрешская типография», 2016. 172 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26550132&

2. Федоренко В. Ф., Завалина А. А., Милащенко Н. З. Научные основы производства высококачественного зерна пшеницы: науч. издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 396 с. Режим доступа: https://rosinformagrotech.ru/data/elektronnye-kopii-izdanij/rastenievodstvo/send/5-rastenievodstvo/1267-nauchnye-osnovy-proizvodstva-vysokokachestvennogo-zerna-pshenitsy-2018g

3. Жученко А. А. Мобилизация генетических ресурсов цветковых растений на основе их идентификации и систематизации. М., 2012. 584 с. Режим доступа: http://el.z-pdf.ru/31biologiya/137543-1-zhuchenko-a-mobilizaciya-geneticheskih-resursov-cvetkovih-rasteniy-osnove-identifikacii-sistematizaci.php

4. Лыкова Н. А. Принцип ускоренного испытания генотипов. Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2008;(3):3-4.

5. Стефанова Н. А. Влияние материнского фенотипа на посевные качества семян яровой пшеницы. Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 1998;(3):8-10.

6. Naegle E. R., Burton J. W., Carter T. E., Rufty T. W. Influence of seed nitrogen content on seedling growth and recovery from nitrogen stress. Plant Soil. 2005;(271):329-340. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-004-3242-4

7. Baskin J., Baskin C. How much influence does the paternal parent have on seed germination? Seed Science Research. 2019;29(1):1-11. DOI: https://doi.org/10.1017/S0960258518000417

8. Тиходеев О. Н. Эпигенетические и эугенетические процессы. Успехи современной биологии. 2015;135(6):542-553. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25457183

9. Дьяченко О. В., Захарченко Н. С., Шевчук Т. В., Бонерт Х., Кушман Дж., Бурьянов Я. И. Гиперметилирование CCWGG последовательностей в ДНК растений Mesembryanthemum crystallinum при их адаптации к солевому стрессу. Биохимия. 2006;71(4):570-575. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9194797

10. Cushman John C., Tillett Richard L., Wood Joshua A., Branco Joshua M., Schlauch Karen A. Large-scale mRNA expression profiling in the common ice plant, mesembryanthemum crystallinum, performing C3 photosynthesis and crassulacean acid metabolism (CAM). Journal of experimental botany. 2008;59(7):1875-1895.

11. Бурьянов Я. И. Адаптивная эпибиохимия и эпигенетика (обзор). Биохимия. 2015;80(9):1376-1390. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24260193

12. Лисицын Е. М. Методика лабораторной оценки алюмоустойчивости зерновых культур. Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2003;(3):5-7.

13. Яковлева О. В. Фитотоксичность ионов алюминия. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2018;179(3):315-331. DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2018-3-315-331

14. Косарева И. А. Изучение коллекций сельскохозяйственных культур и диких сородичей по признакам устойчивости к токсическим элементам кислых почв. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2012;170:34-44.

15. Волкова Л. В., Амунова О. С. Наследование признаков алюмоустойчивости проростков яровой пшеницы в условиях рулонной культуры. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019;20(1):20-28. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.1.20-28

16. Амунова О. С. Влияние метеоусловий превегетации на урожайность и урожайные качества семян мягкой яровой пшеницы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019;20(5):437-446. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.5.437-446

17. Minichin P. E. H., Thorpe M. R., Farrar J. F. Short-term control of root shoot partitioning. Journal of experimental botany. 1994;45(274):615-622.

18. Lykova N. A., Popov A. I., Alexeeva D. I. The influence of edaphic and hydrothermal factors on maternal plant's, seed's and seedling's properties for spring wheat and barley cultivars. Annales UMCS, Sec. E. 2007;LXII(2):193-204. URL: https://www.researchgate.net/publication/277891252_The_influence_of_edaphic_and_hydrothermal_factors_on_theproperties_of_maternal_plants_seeds_and_seedlings_properties_of_spring_wheat_and_barley_cultivars

19. Kopittke P. M. Role of phytohormones in al-uminium rhizotoxicity. Plant Cell Environ. 2016;39(10):2319-2328. DOI: https://doi.org/10.1111/pce.12786

***References***

1. Chesnokov Yu. V., Kosolapov V. M. *Geneticheskie resursy rasteniy i uskorenie selektsionnogo protsessa*. [Plant genetic resources and acceleration of the breeding process]. Moscow: *OOO «Ugreshskaya tipografiya»*, 2016. 172 p. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26550132&

2. Fedorenko V. F., Zavalina A. A., Milashchenko N. Z. *Nauchnye osnovy proizvodstva vysokokachestvennogo zerna pshenitsy: nauch. izdanie*. [Scientifi c foundations for the production of high-quality wheat grain: scientifi c edition]. Moscow: *FGBNU «Rosinformagrotekh»*, 2018. 396 p. URL: https://rosinformagrotech.ru/data/elektronnye-kopii-izdanij/rastenievodstvo/send/5-rastenievodstvo/1267-nauchnye-osnovy-proizvodstva-vysokokachestvennogo-zerna-pshenitsy-2018g

3. Zhuchenko A. A. *Mobilizatsiya geneticheskikh resursov tsvetkovykh rasteniy na osnove ikh identifikatsii i sistematizatsii*. [Mobilization of genetic resources of flowering plants on the base of their identification and systematization]. Moscow, 2012. 584 p. URL: http://el.z-pdf.ru/31biologiya/137543-1-zhuchenko-a-mobilizaciya-geneticheskih-resursov-cvetkovih-rasteniy-osnove-identifikacii-sistematizaci.php

4. Lykova N. A. *Printsip uskorennogo ispytaniya genotipov*. [The rapid ecological crop trial principle]. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2008;(3):3-4. (In Russ.).

5. Stefanova N. A. *Vliyanie materinskogo fenotipa na posevnye kachestva semyan yarovoy pshenitsy.* [The influence of the maternal phenotype on the sowing qualities of spring wheat seeds]. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 1998;(3):8-10. (In Russ.).

6. Naegle E. R., Burton J. W., Carter T. E., Rufty T. W. Influence of seed nitrogen content on seedling growth and recovery from nitrogen stress. Plant Soil. 2005;(271):329-340. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-004-3242-4

7. Baskin J., Baskin C. How much influence does the paternal parent have on seed germination? Seed Science Research. 2019;29(1):1-11. DOI: https://doi.org/10.1017/S0960258518000417

8. Tikhodeev O. N. *Epigeneticheskie i eugeneticheskie protsessy*. [Epigenetic and eugenetic processes]. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2015;135(6):542-553. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25457183

9. D'yachenko O. V., Zakharchenko N. S., Shevchuk T. V., Bonert X., Kushman Dzh., Bur'yanov Ya. I. *Gipermetilirovanie CCWGG posledovatel'nostey v DNK rasteniy Mesembryanthemum crystallinum pri ikh adaptatsii k solevomu stressu*. [Effect of hypermethylation of CCWGG sequences in DNA of *Mesembryanthemum crystallinum* plants on their adaptation to salt stress]. *Biokhimiya*. 2006;71(4):570-575. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9194797

10. Cushman John C., Tillett Richard L., Wood Joshua A., Branco Joshua M., Schlauch Karen A. Large-scale mRNA expression profiling in the common ice plant, mesembryanthemum crystallinum, performing C3 photosynthesis and crassulacean acid metabolism (CAM). Journal of experimental botany. 2008;59(7):1875-1895.

11. Bur'yanov Ya. I. *Adaptivnaya epibiokhimiya i epigenetika (obzor)*. [Adaptive epibiochemistry and epigenetics (review)]. *Biokhimiya*. 2015;80(9):1376-1390. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24260193

12. Lisitsyn E. M. *Metodika laboratornoy otsenki alyumoustoychivosti zernovykh kul'tur*. [Methods for laboratory evaluation of alum stability in grain crops]. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2003;(3):5-7. (In Russ.).

13. Yakovleva O. V. *Fitotoksichnost' ionov alyuminiya*. [Phytotoxicity of aluminum ions]. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2018;179(3):315-331. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2018-3-315-331

14. Kosareva I. A. *Izuchenie kollektsiy sel'skokhozyaystvennykh kul'tur i dikikh sorodichey po priznakam ustoychivosti k toksicheskim elementam kislykh pochv*. [The study of crops and wild relatives collections for signs of resistance to toxic elements of acid soils]. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2012;170:34-44. (In Russ.).

15. Volkova L. V., Amunova O. S. *Nasledovanie priznakov alyumoustoychivosti prorostkov yarovoy pshenitsy v usloviyakh rulonnoy kul'tury*. [Inheritance of aluminum resistance characteristics in spring wheat sprouts under conditions of a roll culture]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(1):20-28. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.1.20-28

16. Amunova O. S. *Vliyanie meteousloviy prevegetatsii na urozhaynost' i urozhaynye kachestva semyan myagkoy yarovoy pshenitsy*. [Influence of weather conditions during the pre-vegetation period on productivity and yield qualities of soft spring wheat seeds]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(5):437-446. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.5.437-446

17. Minichin P. E. H., Thorpe M. R., Farrar J. F. Short-term control of root shoot partitioning. Journal of experimental botany. 1994;45(274):615-622.

18. Lykova N. A., Popov A. I., Alexeeva D. I. The influence of edaphic and hydrothermal factors on maternal plant's, seed's and seedling's properties for spring wheat and barley cultivars. Annales UMCS, Sec. E. 2007;LXII(2):193-204. URL: https://www.researchgate.net/publication/277891252_The_influence_of_edaphic_and_hydrothermal_factors_on_the_properties_of_maternal_plants_seeds_and_seedlings_properties_of_spring_wheat_and_barley_cultivars

19. Kopittke P. M. Role of phytohormones in al-uminium rhizotoxicity. Plant Cell Environ. 2016;39(10):2319-2328. DOI: https://doi.org/10.1111/pce.12786

***Сведения об авторах***

✉ **Волкова Людмила Владиславовна**, кандидат биол. наук, зав. лабораторией, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0837-8425**, e-mail: volkovkirov@mail.ru

**Тулякова Марина Валентиновна**, ст. научный сотрудник, Фалёнская селекционная станция – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Тимирязева, д. 3, п. Фалёнки, Кировская область, Российская Федерация, 612500, e-mail: fss.nauka@mail.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4493-1005**

***Information about the authors***

✉ **Lyudmila V. Volkova,** PhD in Biology, head of the laboratory, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0837-8425,** e-mail: volkovkirov@mail.ru

**Marina V. Tulyakova**, senior researcher, Falenki Breeding Station – Branch of «Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky», Timiryazev str., 3, s. Falenki, Kirov region, Russian Federation, 612500, e-mail: fss.nauka@mail.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4493-1005**

✉ – Для контактов / Corresponding author