

DOI 10.5281/zenodo.10135282

EDN NDSYZK

УДК 633.112.1

Ерёмин Д. И.<sup>1</sup>, Ерёмина Д. В.<sup>2</sup>, Любимова А. В.<sup>1</sup>

## ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ВОДЫ И ИНДЕКС СТАБИЛЬНОСТИ КЛЕТОЧНЫХ МЕМБРАН ЛИСТЬЕВ КАК ИНСТРУМЕНТЫ СКРИНИНГА ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ ОВСА

<sup>1</sup>ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр сибирского отделения РАН»»;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

**Реферат.** В условиях периодического проявления летних засух в зоне умеренных широт создание засухоустойчивых сортов овса является ключевой задачей для селекционеров. При оценке исходного материала рационально применять экспресс-методы, выявляющие стресс растения, вызванный абиотическими факторами. Цель исследований – поиск засухоустойчивых генотипов для селекции овса по показателям, характеризующим реакцию клеточных мембран на стресс, вызванный дефицитом почвенной влаги. Исследования проводили в 2020–2022 гг. в летней теплице, исключающей попадание осадков. Изучено 40 отечественных сортов овса из коллекции ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Тюменского научного центра сибирского отделения Российской академии наук». Определяли индекс стабильности мембран (MSI) и относительное содержание воды (RWC) в листьях. Варианты опыта: 1. Контроль – овес рос в оптимальных по увлажнению условиях; 2. Почвенная засуха в фазе кущения; 3. Засуха в фазе цветения. В среднем по коллекции снижение MSI при засухе в кущение и цветение составило 14 и 10 % соответственно. Снижение RWC – 12 и 10 %. У сортов Привет, Сиг, Фауст, КРОСС, Чиж, Льговский 82 и Улов снижение индекса клеточных мембран было менее 10 %, а снижение относительного содержания воды в листьях – менее 8 %. Их можно рекомендовать для селекции на засухоустойчивость. У сортов Егорыч, Таежник, Дедал, Десант, Покровский 9 и Песец снижение MSI было более 16 и 12 % соответственно. Выявлены сорта, у которых почвенная засуха в фазе кущения вызывала сильный стресс, отсутствующий при более поздней засухе. Установлена очень слабая корреляция между абсолютными значениями MSI, RWC и элементами структуры урожая. Отмечена тесная связь между относительным снижением данных показателей и массой 1000 зерен – коэффициент корреляции составил 0,81 и 0,75 соответственно. Рекомендуется использование индекса стабильности мембран и относительного содержания воды в листьях при подборе родительских форм и анализе гибридных комбинаций в селекции засухоустойчивых сортов овса.

**Ключевые слова:** овёс посевной (*Avena sativa* L.), стресс растений, засухоустойчивость овса, индекс стабильности мембран, почвенная засуха, нарушение биохимических реакций, родительские формы.

**Для цитирования:** Ерёмин Д. И., Ерёмина Д. В., Любимова А. В. Относительное содержание воды и индекс стабильности клеточных мембран листьев как инструменты скрининга засухоустойчивости овса // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 3(35). С. 74–88. EDN: NDSYZK. DOI: 10.5281/zenodo.10135282.

**For citation:** Eremin D. I., Eremina D. V., Lyubimova A. V. Relative water content and leaf cell membrane stability index as screening tools for drought tolerance in oats // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2023. No. 3(35). P. 74–88. EDN: NDSYZK. DOI: 10.5281/zenodo.10135282.

### Введение

Обеспечение продовольственной безопасности Российской Федерации подразумевает активное использование достижений науки в агропромышленном комплексе страны. Разработка научно обоснованных технологий обработки почвы, системы удобрений, ухода и защиты посевов от вредителей обеспечила стабильное повышение урожайности сельскохозяйственных культур, а созданные селекционерами сорта в максимальной степени реализуют биоклиматический потенциал основных сельскохозяйственных регионов страны [1–3].

Основная часть территории России находится в умеренных широтах, где возделывание основных зерновых культур малоэффективно по причине неблагоприятных почвенно-климатических особенностей. Особенно эта проблема выражена в Сибири, где на фоне короткого вегетационного периода с относительно невысокими эффективными температурами практически ежегодно проявляются почвенные и атмосферные засухи. В таких регионах для создания стабильной кормовой базы животноводства приоритетной зерновой культурой становится овёс. Его продуктивность на низкоплодородных почвах значительно выше, чем у ячменя и яровой пшеницы [4, 5].

Основные почвы, на которых ведется сельское хозяйство в Сибири – это подзолистые и серые лесные почвы. Часть из них находится в целинном и залежном состоянии, тем самым обуславливая потенциал для расширения земель сельскохозяйственного назначения. Вместе с тем, необходимо признать, что селекция овса не успевает за потребностями агропромышленного комплекса России [6]. Прежде всего это проявляется в дефиците засухоустойчивых сортов интенсивного типа, способных формировать урожай в условиях средних широт Сибири. Поэтому необходимо приложить усилия по подбору родительских генотипов для получения сортов овса, максимально реализующих биоклиматический потенциал Сибири [7].

Выявление засухоустойчивости зерновых культур, в том числе и овса – важная задача селекционеров [8, 9]. Это обусловлено тем, что дефицит почвенной влаги может оказать необратимое негативное воздействие на клеточном уровне, вызывая нарушения биохимических реакций, что приводит к снижению урожайности, а в худшем случае – гибели посевов. Поэтому, кроме комплексного фенотипирования необходимо применять экспресс-методы, выявляющие стресс растения, вызванный абиотическими факторами.

Физиологами доказано, что для устойчивости растений к стрессовым факторам важно сохранение целостности клеточной мембраны, которая выступает первой линией защиты растения от абиотических факторов [10]. Мембраны быстро реагируют на изменения внешней среды, но при этом включают защитные механизмы всей клетки. Поэтому по эффективности системы регуляции проницаемости мембран и поддержания гомеостаза можно выявить сорта, наиболее устойчивые к неблагоприятным внешним факторам, в том числе к дефициту влаги [11].

Наиболее доступными и эффективными показателями, характеризующими засухоустойчивость генотипов, можно считать индекс устойчивости мембран (Membrane Stability Index), а также относительное содержание воды в листьях (Relative Water Content) во время засухи. Поиск генотипов с высокими значениями MSI и RWC играет важную роль при создании засухоустойчивых сортов [12]. Учеными доказано наличие связи генов засухоустойчивости пшеницы с данными показателями [13]. Однако исследования реакции овса на почвенную засуху с использованием физиологических показателей состояния растений (MSI и RWC) начались относительно недавно [14]. Селекционеры овса пользовались более простыми методами: индексом снижения урожайности, геометрической продуктивностью или морфологическими признаками, наиболее подходящими для получения информации

об экологической устойчивости и пластичности сорта. Причиной этого является то, что овёс преимущественно выращивают в зоне достаточного увлажнения и до настоящего времени для него селекция на засухоустойчивость и жаростойкость была неактуальной. Однако, в условиях глобального потепления в умеренных широтах почвенные засухи стали обычным явлением. Это привело к необходимости поиска засухоустойчивых генотипов овса для введения их в селекционный процесс.

**Цель исследований** – выявление засухоустойчивых генотипов для селекции овса по показателям, характеризующим реакцию клеточных мембран на стресс, вызванный дефицитом почвенной влаги.

#### **Материалы и методы исследований**

Исследования проводили в теплице без искусственного подогрева и освещения в весенне-летний период 2020–2022 гг. на территории ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья» (п. Московский Тюменского района). Институт расположен в лесостепной зоне Западной Сибири (57°09' N, 65°32' E). В качестве материала для исследования использовали 40 сортов овса посевного (*Avena sativa* L.) российской селекции (таблица 1). В перечень изучаемых сортов вошли: 25 среднеспелых сортов (63 %), 10 среднеранних (25 %), три раннеспелых и два среднепоздних.

Оценку степени засухоустойчивости сортов проводили путем сравнения средних значений по коллекции, а также процентного снижения показателей относительно контроля – среднего снижения по коллекции. Использование в качестве стандарта засухоустойчивости определенного сорта было нерационально по причине присутствия в коллекции сортов разных групп спелости, разновидностей и потенциальной продуктивности. Кроме того, в научных кругах отсутствует единое мнение о стандарте засухоустойчивости для овса [15].

Семена для проведения опытов отбирали из коллекции лаборатории геномных исследований в растениеводстве и высевали в однородных почвенных и гидротермических условиях.

Перед закладкой опыта весь семенной материал обрабатывали протравителем «Ламадор» (производитель Байер) с действующими веществами протиоконазол 250 г/л и тебуконазол 150 г/л. Норма расхода составила в пересчете на 1 т зерна 0,2 л. После обработки фунгицидом зерно просушивали и пересыпали в бумажные пакетики.

В опыте использовали пластиковые контейнеры с размерами 40×30, высотой 20 см, объемом 24 л. В контейнеры засыпали почвогрунт, взятый из пахотного слоя опытного поля института. По гранулометрическому составу грунт характеризовался как среднесуглинистый иловато-пылеватый. По физико-химическим и агрохимическим показателям соответствовал гумусовому горизонту серой лесной почвы [16, 17]. Содержание гумуса (ГОСТ 26213-2021) составляло 3,0–3,2 %, нитратного азота (ГОСТ 26951-86) – 4,5–4,7 мг/кг, подвижных форм фосфора и калия (ГОСТ Р 54650-2011) – 57–60 и 86–90 мг/кг почвы соответственно.

В эксперименте применяли рекомендуемую для лесостепи Зауралья дозу минеральных удобрений – N<sub>60</sub>P<sub>20</sub> кг/га, рассчитанную на формирование урожайности зерна 3,0 т/га [18]. За пять суток до посева каждый контейнер с почвогрунтом орошали водопроводной водой с рН 7,6, электропроводностью 20,00 мкСм/м, насыщая его до 80 % полевой влагоемкости. За это время вода распределялась по пустотам почвогрунта и происходило уплотнение до равновесного состояния – 1,20 г/см<sup>3</sup> [19]. В каждый контейнер высевали по 30 семян, распределяя их равномерно по площади. Глубина посева 7 см. Через пять суток подсчитали количество всходов и провели первое прореживание. Густота стояния на момент всходов составила 245–250 шт./м<sup>2</sup>. Убирали недоразвитые и отстающие в росте растения. Через 15 дней проводили второе прореживание, оставляя в контейнере 25 хорошо развитых и фенотипически

однородных растений [20], что соответствовало густоте стояния овса 200 шт./м<sup>2</sup> к началу уборочных работ. Создание изреженных посевов обусловлено ограниченным объемом почвогрунта, что при создании стандартной густоты посева привело бы к угнетению растений.

Таблица 1 – Перечень сортов овса, используемых в опыте

№ п/п	Сорт	Разновидность	Группа спелости	Год включения в Государственный реестр селекционных достижений
1	Ассоль	<i>mutica</i>	раннеспелый	2018
2	Покровский 9	<i>aristata</i>	раннеспелый	1993
3	Таёжник	<i>aurea</i>	раннеспелый	1977
4	Аватар	<i>aurea</i>	среднеранний	2017
5	Виленский	<i>mutica</i>	среднеранний	2016
6	Десант	<i>aristata</i>	среднеранний	2018
7	Мегион	<i>mutica</i>	среднеранний	1993
8	Новосибирский 5	<i>mutica</i>	среднеранний	2013
9	Ровесник	<i>obtusata</i>	среднеранний	1995
10	Улов	<i>mutica</i>	среднеранний	1992
11	Уран	<i>aristata</i>	среднеранний	2014
12	Черниговский 83	<i>aurea</i>	среднеранний	1972
13	Чиж	<i>aurea</i>	среднеранний	2003
14	Баргузин	<i>mutica</i>	среднеспелый	1994
15	Борец	<i>mutica</i>	среднеспелый	2002
16	Буланный	<i>mutica</i>	среднеспелый	2021
17	Горизонт	<i>mutica</i>	среднеспелый	1979
18	Дедал	<i>mutica, aristata</i>	среднеспелый	2018
19	Егорыч	<i>obtusata</i>	среднеспелый	2011
20	ЗАЛП	<i>mutica, aurea</i>	среднеспелый	2015
21	Иртыш 13	<i>mutica</i>	среднеспелый	1991
22	Конкур	<i>mutica</i>	среднеспелый	2008
23	КРОСС	<i>mutica</i>	среднеспелый	2022
24	Льговский	<i>mutica</i>	среднеспелый	2021
25	Нарымский 943	<i>mutica</i>	среднеспелый	1963
26	Овен	<i>mutica</i>	среднеспелый	1997
27	Орион	<i>mutica</i>	среднеспелый	1996
28	Передовик	<i>brunnea</i>	среднеспелый	2022
29	Песец	<i>mutica, aristata</i>	среднеспелый	1968
30	Привет	<i>aurea</i>	среднеспелый	1999
31	СИГ	<i>aristata</i>	среднеспелый	2008
32	Галисман	<i>mutica</i>	среднеспелый	2002
33	Тигровый	<i>cinerea</i>	среднеспелый	2002
34	Тубинский	<i>mutica</i>	среднеспелый	2004
35	Факел	<i>aristata</i>	среднеспелый	2018
36	Фауст	<i>mutica</i>	среднеспелый	2002
37	Экспресс	<i>cinerea</i>	среднеспелый	1998
38	Юбиляр	<i>mutica</i>	среднеспелый	2006
39	Аргумент	<i>aristata</i>	среднепоздний	2005
40	Льговский 82	<i>mutica</i>	среднепоздний	1992

Исследования предусматривали следующие варианты опыта:

1) отсутствие засухи (контроль). Полив осуществляли регулярно, не допуская снижения влажности почвы ниже 60 % от наименьшей влагоемкости;

2) засуха в фазе кущения;

3) засуха в фазе цветения.

До наступления выбранных фенологических фаз растения регулярно поливали раз в неделю. При появлении первых признаков наступления кущения и цветения (единичные растения с начавшейся фенологической фазой) полив прекращали на 14 суток, добиваясь понижения влажности почвы до 30–35 % от наименьшей влагоемкости путем естественного испарения. Через две недели снимали предусмотренные в опыте показатели и возобновляли полив до полного созревания зерна. Опыт предусматривал трехкратное повторение, в каждом из которых отбирали листья с 10 растений.

Относительное содержание воды (Relative Water Content) в листьях овса определяли в соответствии с методикой, представленной в работах Schonfeld et.al. и Pardossi et.al. [21, 22]. Данный метод позволяет оценить реальное содержание воды в отобранных образцах листьев относительно максимального содержания воды при полном тургоре. Нормальные значения RWC растений варьируют от 98 до 40 %. У большинства злаковых культур, имеющих визуальные признаки увядания, RWC находится в пределах 60–70 %. При достижении 50–60 % зерновые культуры испытывают сильнейший стресс, в это время на клеточном уровне происходят необратимые биохимические изменения [23]. При относительном содержании воды в растениях менее 40 % основная часть зерновых культур погибает [24].

Для расчета RWC в период с 11 до 12 часов по местному времени срезали хорошо развитые листья ножницами таким образом, чтобы их общая площадь составила 10–12 см<sup>2</sup>. Образцы с каждого варианта помещали в герметичные пластиковые пробирки с объемом 50 мл и укладывали в сумку-контейнер с постоянной температурой 10–12 °С. В минимально короткие сроки все собранные образцы доставляли в лабораторию, где проводили взвешивание массы свежих листьев (W). Далее образцы переносили в чашки Петри с деионизированной водой и оставляли на шесть часов. Все чашки Петри размещали на лабораторном столе в один ярус, чтобы соблюсти равномерность температуры (20–22 °С) и освещенность. После полного набухания образцы извлекали из воды, осторожно протирали фильтровальной бумагой и взвешивали (TW). Далее растительные образцы размещали в термостате и высушивали в течении суток при температуре 80 °С. После этого высушенный до воздушно-сухого состояния материал помещали в эксикатор для охлаждения до комнатной температуры с последующим определением сухой массы (DW). Все взвешивания проводили с точностью 0,001 г. Расчет относительного содержания воды вели по формуле 1.

$$RWC(\%) = [(W - DW)/(TW - DW)] \times 100 \quad (1)$$

где W – масса свежих листьев, г (Sample fresh weight);

TW – масса набухших листьев, г (Sample turgid weight);

DW – масса высушенных листьев, г (Sample dry weight).

Устойчивость к стрессу, вызванному почвенной засухой, оценивали по индексу стабильности клеточных мембран (Membrane Stability Index, далее MSI). Для этого, одновременно с отбором проб на RWC брали навеску листьев массой 4 г, осторожно протирали влажной салфеткой от пыли и помещали в стеклянную колбу объемом 100 мл. Далее заливали образцы бидистиллированной водой (100 мл) и ставили на водяную баню на 1 час при температуре 45 °С. По истечении времени колбы охлаждали до комнатной температуры. Далее часть раствора без фильтрации осторожно переносили в стеклянный стаканчик, где проводили измерение электропроводности раствора после инкубации (C<sub>1</sub>) кондуктометром «Марк-602» от производителя «ВЗОР» (Россия). Затем раствор из стаканчика переносили обратно в колбу. После всех измерений образцы вновь нагревали на водяной бане в течении 15 минут при температуре 100 °С для полного разрушения клеток и выхода электролитов, содержащихся в растительном

образце. Затем повторно определяли электропроводности ( $C_2$ ). Расчет индекса стабильности мембраны (MSI) проводили по формуле 2:

$$MSI = \left[ 1 - \left( \frac{C_1}{C_2} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

где  $C_1$  – электропроводность раствора после первой инкубации (температура – 45 °С, экспозиция – 1 час);

$C_2$  – электропроводность раствора после второй инкубации (температура – 100 °С, экспозиция – 15 минут).

Полученные результаты лабораторных исследований анализировали с помощью дисперсионного анализа с применением программного продукта Microsoft Excel.

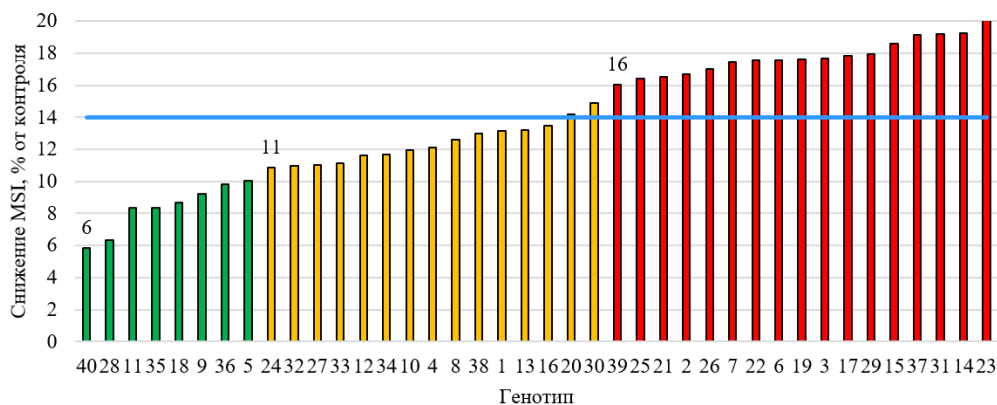
### Результаты и их обсуждение

В ходе проведения исследований установлено, что индекс стабильности мембран преимущественно зависит от генотипа, разница значений между кущением и цветением в целом по коллекции незначительна. В среднем по коллекции в контроле MSI был равен 60,3 % при варьировании от 45,5 (Буланый, Дедал) до 75,6 % (Льговский 82, Аватар). При проявлении засухи в фазе кущения и цветения стабильность клеточной мембраны достоверно снижалась – MSI в среднем по коллекции составил 14 и 10 % соответственно ( $F_{\text{крит.}} > F_{\text{теор.}}$  при  $p = 0,05$ ). Это подтверждает, что овес достаточно негативно реагирует на дефицит почвенной влаги в критические фазы развития. К аналогичным выводам ранее пришли Р. Peltonen-Sainio и Р. Mäkelä в 1994 г. Они отметили, что во время стресса, вызванного засухой в первой половине вегетации, физиологические показатели овса (содержание хлорофилла, протеина, индекс стабильности мембран и относительное содержание воды в листьях) снижались на 15–20 % относительно контроля [25]. Исследования, проведенные на территории Эфиопии группой ученых под руководством Gezahagn Kebede, опубликованные в 2023 г., показали высокую корреляционную связь между агроморфологическими показателями и индексами, характеризующими физиологическое состояние овса во время почвенных засух [26]. Разная реакция на дефицит почвенной влаги в период кущения и цветения обусловлена тем, что у отдельных сортов в начале вегетации клеточная мембрана остается нестабильной благодаря дефициту жирных кислот. Во время засухи это усиливает стресс, который выражается в нарушении цикла синтеза метаболитов, отвечающих за работу устьичного аппарата. В конечном итоге молодые растения начинают терять влагу, что приводит к их гибели [27]. Это подтверждается и нашими исследованиями – степень потери относительного содержания влаги в листьях овса во время кущения варьирует по коллекции в диапазоне 2–27 %, а в цветение – 4–21 %.

В ходе ранжирования генотипов по снижению индекса стабильности клеточных мембран установлено, что в коллекции присутствуют сорта, на которые засуха в период кущения оказывает минимальное влияние. В эту группу входят: Улов, КРОСС, Привет, Сиг, Чиж, Льговский 82, Мегион и Фауст – снижение MSI было менее 10 % относительно контроля (рисунок 1). Часть из этих сортов обладали минимальным снижением MSI и при поздней почвенной засухе – Привет, Сиг, Фауст, КРОСС, Чиж, Льговский 82 и Улов ( $Q_1 < 6$  %) (рисунок 2). Сорт Мегион перешел в другой ранг ( $Q_2$ ), где достоверность воздействия засухи на индекс стабильности мембран не доказана ( $F_{\text{крит.}} < F_{\text{теор.}}$ ). Устойчивость к засухе во время цветения также была отмечена у сортов Ассоль и Передовик, MSI которых при засухе в период их кущения составил 18% ( $Q_4$ ) и 11% ( $Q_2$ ) соответственно. Избирательную толерантность к поздней засухе этих сортов отметили в своих работах В.А. Федорова и ее коллеги [28].

Выделены наименее устойчивые генотипы, MSI которых во время засухи в фазе кущения уменьшился более чем на 15 % ( $Q_4$ ) от средней величины. К этой группе отнесены 17 образцов, среди которых выделяются сорта: Егорыч, Конкур, Черниговский 83, Иртыш 13, Дедал. Они показали наименьшую степень устойчивости к засухе по индексу

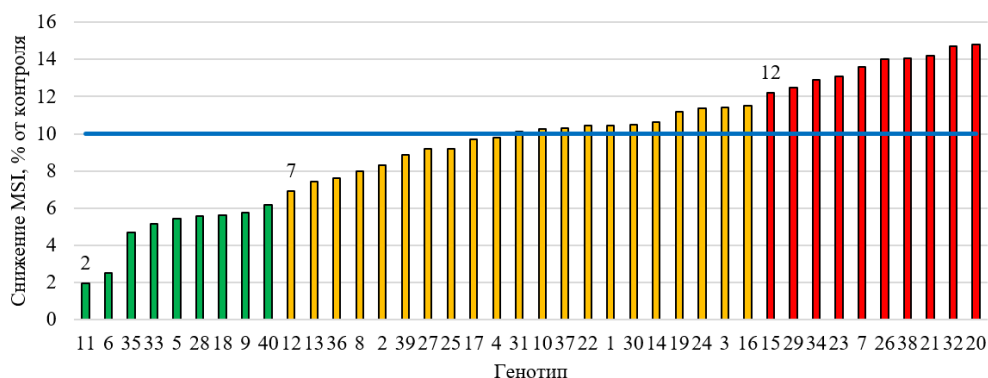
стабильности мембраны. По данным оригинаторов, эти сорта обладают средней засухоустойчивостью, а сорт Иртыш 13 – сильно засухоустойчив [29].



**Рисунок 1 – Снижение индекса стабильности клеточных мембран (Membrane Stability Index) в результате стресса, вызванного почвенной засухой в период кущения, Q1<10%; 10<Q2<13; 13<Q3<16; Q4>16 % от контроля**

*Примечание. Здесь и далее: ранжирование проведено квартильным способом: Q1 – зеленый; Q2+Q3 – желтый; Q4 – красный. Синяя линия – среднее снижение по изучаемой коллекции. (Q2+Q3) – снижение статистически недостоверно при  $p=0,05$ . Номера генотипов здесь и далее указаны в таблице 1.*

Причиной противоречивости заявленной оригинаторами степени засухоустойчивости мы видим в том, что она определялась по данным полевых наблюдений в разные по увлажнению годы. В ходе проведения сравнительного испытания А. Е. Зинатуллина пришла к выводу, что для определения засухоустойчивости сортов необходимы комплексные испытания как на ранних этапах онтогенеза, так и в более поздние периоды развития. [30].

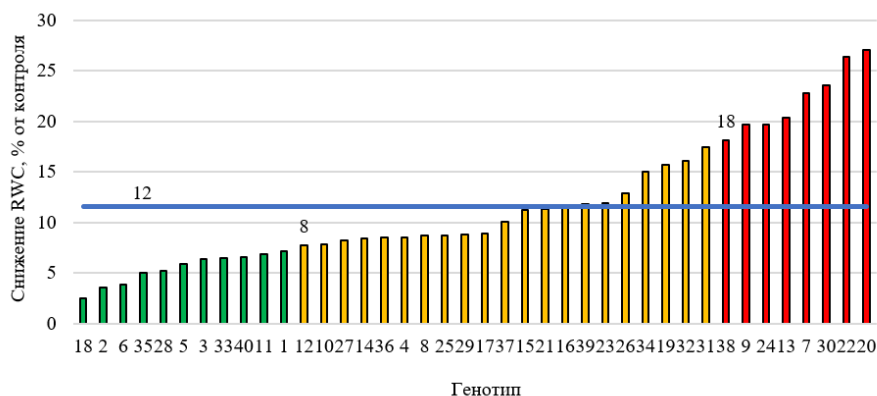


**Рисунок 2 – Снижение индекса стабильности клеточных мембран (Membrane Stability Index) в результате стресса, вызванного почвенной засухой в период цветения, Q1<6%; 6<Q2<9; 9<Q3<12; Q4>12 % от контроля**

Относительное содержание воды в листьях зерновых культур преимущественно зависит от генотипа [31, 32]. Современные исследования показали, что степень проницаемости воды сквозь клеточную мембрану зависит от наличия и активности особой группы белков. Содержание данных белков кодируется определенными генами, тем самым определяется генетическая засухоустойчивость вида (сорта) растения. Активность белков, отвечающих за трансмембранный поток воды в условиях стресса, вызванного засухой и высокой температурой, определяется степенью синтеза

определенных гормонов. Скорость и количество выделяемых гормонов, стимулирующих движение воды сквозь мембрану клетки, зависит от внешних факторов, а также стадии развития растения [33, 34]. Этим обусловлена различная реакция на засуху овса в период кущения и цветения.

Средний по коллекции RWC составил 68,5 % при варьировании от 53,8 (Иртыш 13) до 89,1 (Борец). При создании засушливых условий в фазе кущения относительное содержание воды в листьях овса уменьшилось в среднем по коллекции до 60,0 %, варьируя от  $50,3 \pm 3,4$  % (Льговский) до  $70,7 \pm 2,6$  % (Чиж). Данный факт указывает на то, что среди 40 изучаемых сортов не оказалось ни одного, который имеет толерантность к почвенной засухе в период кущения. К аналогичным выводам пришла группа ученых во главе с Кабашовым [35]. Ранжирование сортов по степени снижения RWC относительно контроля (сорта на регулярном поливе) выявило генотипы, относительное содержание воды в листьях которых снижалось в минимальной степени ( $Q_1 < 8$  %): Чиж, Баргузин, Ассоль, Сиг, КРОСС, Фауст, Овен, Передовик, Улов, Привет, Юбиляр. Также были выделены сорта, у которых снижение RWC было достоверно выше 18 % относительно контроля ( $F_{\text{крит.}} < F_{\text{теор.}}$ ) (рисунок 2). К ним относятся: Буланный, Льговский 82, Орион, Факел, Десант, Нарымский 943, Борец и Льговский. Вместе с тем, Льговский 82 по значению MSI был отнесен к потенциально засухоустойчивым сортам. Данный факт указывает на то, что прямой корреляции между MSI и RWC нет. Произведенный расчет коэффициента корреляции показал отсутствие связи ( $r = 0,22$ ) между снижением значений данных показателей в период кущения овса. Половина генотипов из изучаемой коллекции (21 сорт из 40) характеризовались недостоверным снижением относительного содержания воды в листьях под действием почвенной засухи в период кущения (рисунок 3). Это доказывает, что листовой аппарат овса на ранних стадиях онтогенеза не испытывает критического воздействия почвенной засухи. Синтез ферментов, стимулирующих трансмембранное движение воды из клеток, происходит своевременно, тем самым препятствуя снижению тургора до критических значений. После устранения почвенной засухи ассимиляционный аппарат многих сортов овса восстанавливается и обеспечивает полноценный налив зерна. К аналогичным выводам пришли ученые из России и Китая [36, 37].

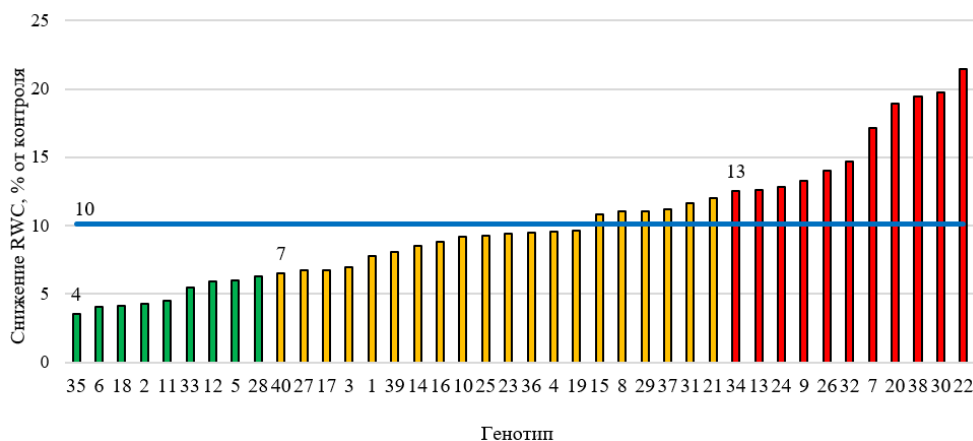


**Рисунок 3 – Снижение относительного содержания воды (Relative Water Content) в листьях овса в результате стресса, вызванного почвенной засухой в период кущения,  $Q_1 < 8\%$ ;  $8 < Q_2 < 12$ ;  $12 < Q_3 < 18$ ;  $Q_4 > 18$  % от контроля**

Дефицит почвенной влаги в период цветения овса оказывает достаточно сильное влияние на такой элемент урожайности как масса 1000 зерен. Это указывает на нарушение синтеза углеводов и протеина, а также движения метаболитов из листового аппарата в зерно [38–40].



Установлено, что из всей коллекции лишь девять сортов характеризовались минимальным снижением RWC ( $Q_1 < 6\%$  относительно контроля). В первый квартиль вошли Сиг, Ассоль, Чиж, Баргузин, Привет, Передовик, Новосибирский 5, Фауст и КРОСС (рисунок 4). Группу наиболее сильно выделившихся генотипов по степени снижения относительного содержания воды в листьях ( $Q_4 > 12\%$ ) составили следующие сорта: Экспресс, Факел, Орион, Льговский 82, Покровский 9, Тигровый, Десант, Льговский, Буланный, Нарымский 943, Борец. Рассчитанный коэффициент корреляции между значениями снижения MSI и RWC под действием засухи в период цветения составил 0,66 ед., что соответствует средней степени влияния ( $0,30 < r < 0,75$ ).



**Рисунок 4 – Снижение относительного содержания воды (Relative Water Content) в листьях овса в результате стресса, вызванного почвенной засухой в период цветения,  $Q_1 < 6\%$ ;  $6 < Q_2 < 9$ ;  $9 < Q_3 < 12$ ;  $Q_4 > 12\%$  от контроля**

Проведенный корреляционный анализ показал очень слабую связь между значениями индекса стабильности мембраны, относительного содержания воды в листьях овса и элементами структуры урожая (масса 1000 зерен, масса зерна с главной метелки). Коэффициент корреляции варьировал от -0,3 до +0,2 ед. Однако при использовании относительного снижения данных показателей была установлена прямая тесная связь в парах: MSI/масса 1000 зерен ( $r=0,81$ ) и RWC/масса 1000 зерен ( $r=0,75$ ) в варианте с засухой в период цветения овса. В варианте, где стресс был вызван в период кущения, корреляция между показателями также отсутствовала. Причиной отсутствия корреляции между индексом стабильности мембраны, относительным содержанием воды в листьях и элементами структуры урожая, по нашему мнению, является недостаточно сильный стресс, вызванный засухой в период кущения. Аналогичное мнение высказано в работах Петкуниной (2012) и Свирковой (2016) [41, 42], которые также получили низкую корреляцию между аналогичными показателями.

#### Выводы

В условиях искусственной почвенной засухи на протяжении 2020–2022 гг. была установлена прямая тесная корреляция между показателями MSI, RWC в фазе цветения и массой 1000 зерен овса ( $r = 0,81$  и  $0,75$  соответственно). Отмечены сорта с высокой устойчивостью к стрессу, вызванному засухой в фазе кущения и цветения: Привет, Сиг, Фауст, КРОСС, Чиж, Льговский 82 и Улов, у которых снижение индекса клеточных мембран было минимальным (менее 10 %) относительно контроля, и которые имеют селекционную ценность при создании засухоустойчивых сортов. Остальные генотипы имели сильную негативную реакцию на дефицит почвенной влаги.

*Работа выполнена по госзаданию №122011300103-0 и при поддержке Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня.*

## Литература

1. Ciampitti I. A., Briat J. F., Gastal F., Lemaire G. Redefining crop breeding strategy for effective use of nitrogen in cropping systems // *Commun Biol.* 2022. Iss. 5. Art. No. 823. DOI: 10.1038/s42003-022-03782-2.
2. Voss-Fels K. P., Stahl A., Hickey L. T. Q&A: modern crop breeding for future food security // *BMC Biol.* 2019. Vol. 17. Art. No. 18. DOI: 10.1186/s12915-019-0638-4.
3. Сапега В. А., Турсумбекова Г. Ш. Урожайность, экологическая пластичность и стабильность сортов яровой мягкой и твердой пшеницы в южной лесостепи Тюменской области // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2020. Т. 21. № 2. С. 114–123. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.2.114-123.
4. Перфильев Н. В., Вьюшина О. А., Власенко А. Н. Эффективность систем основной обработки темносерой лесной почвы при возделывании ячменя // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки.* 2021. Т. 51. № 1. С. 11–17. DOI: 10.26898/0370-8799-2021-1-1.
5. Моисеева М. Н., Еремин Д. И. Влияние минеральных удобрений на накопление азота в зерне и соломе овса в лесостепи Зауралья // *Достижения науки и техники АПК.* 2023. Т. 37. № 2. С. 9–16. DOI: 10.53859/02352451\_2023\_37\_2\_9.
6. Evseev V. V., Mikolaychik I. N., Morozova L. A. Model of integrated resistant variety spring wheat for soil-climatic conditions of the Kurgan region // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science “International Conference on Agricultural Science and Engineering”.* 2021. Vol. 845. Art. No. 012059. DOI: 10.1088/1755-1315/845/1/012059.
7. Гулянов Ю. А. Оценка современных биоклиматических ресурсов и перспектив роста урожайности в постцелинных регионах Урала и Западной Сибири // *Таврический вестник аграрной науки.* 2020. № 4(24). С. 29–41. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-4-24-29-41.
8. Тоболова Г. В., Остапенко А. В. Биохимическое исследование коллекции овса посевного и византийского // *Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья.* 2013. Т. 23. № 4. С. 13–16.
9. Аbugалиева А. И., Лоскутов И. Г., Савин Т. В., Чудинов В. А. Изучение голозерного овса из коллекции ВИР на качественные показатели в условиях Казахстана // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2021. Т. 182. № 1. С. 9–21. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-9-21.
10. *Plant Abiotic Stress Physiology: Volume 2: Molecular Advancements* // Ed. by Aftab T., Hakeem K. R. New York: Apple Academic Press, 2022. 322 p. DOI: 10.1201/9781003180579.
11. Wu J., Wang J., Hui W., Zhao F., Wang P., Su C., Gong W. Physiology of plant responses to water stress and related genes: a review // *Forests.* 2022. Vol. 13. No. 2. Art. No. 324. DOI: 10.3390/f13020324.
12. Guoqi W., Ma B.-L., Shi Y., Kui L., Chen W. Selection of oat (*Avena sativa* L.) drought-tolerant genotypes based on multiple yield-associated traits // *J Sci Food Agric.* 2023. Vol. 103. No. 9. P. 4380–4391. DOI: 10.1002/jsfa.12504.
13. ElBasyoni I., Saadalla M., Baenziger S., Bockelman H., Morsy S. Cell membrane stability and association mapping for drought and heat tolerance in a worldwide wheat collection // *Sustainability.* 2017. No. 9. Art. No. 1606. DOI: 10.3390/su9091606.
14. Sánchez-Martín J., Mur L. A. J., Rubiales D., Prats E. Targeting sources of drought tolerance within an *Avena* spp. collection through multivariate approaches // *Planta.* 2012. Vol. 236. No. 5. P. 1529–1545. DOI: 10.1007/s00425-012-1709-8.
15. Сайфуллин Р. Г., Лобачев Ю. В., Бекетова Г. А., Курасова Л. Г. Подбор сортов-стандартов для полевых опытов Госсортсети // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2014. № 6. С. 33–34.
16. Каюгина С. М., Еремин Д. И. Гумусовое состояние темно-серых лесных почв Северного Зауралья // *Вестник КрасГАУ.* 2022. Т. 187. № 10. С. 35–42. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-10-35-42.
17. Каюгина С. М., Еремин Д. И. Физико-химические свойства серых лесных почв восточной окраины Зауральского Плато // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология.* 2022. Т. 15. № 4. С. 471–490. DOI: 10.17516/1997-1389-0399.
18. Eremin D. I., Moiseeva M. N., Lyubimova A. V. The impact of mineral fertilizers on the consumption of mineral elements and the Siberian-bred oat grain // *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science “Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and Abroad” (DAICRA 2021).* 2022. Vol. 949. Art. No. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/949/1/012066.
19. Перфильев Н. В., Вьюшина О. А. Влияние систем обработки на агрофизические параметры темносерой лесной почвы в Северном Зауралье // *Земледелие.* 2023. № 1. С. 27–31. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-1-27-31.
20. Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 1. Общая часть. М.: ФГБУ «Госсорткомиссия». 1989. 329 с.

21. Ortega-Ortega A., Jiménez-Galindo J. C., Parra-Quezada R. Á., Jacobo-Cuellar J. L., Ruiz-Anchondo Teresita D. J., Salmerón-Zamora J. J., Zamudio-Flores P. B., Malvar R. A. Osmotic stress tolerance in forage oat varieties (*Avena sativa* L.) based on osmotic potential trials // *Agronomy Research*. 2023. Vol. 21. No. 1. P. 1200–1210. DOI: 10.15159/AR.23.005.
22. Каршибоев Х. Х., Сиддиков Р. Э., Покровская М. Н. Устойчивость содержания общей воды в листьях и температуры коагуляции белков листьев сортов твердой пшеницы в богарных условиях // *Аграрная наука*. 2018. № 11–12. С. 54–55. DOI: 10.32634/0869-8155-2018-320-11-54-55.
23. Peltonen-Sainio P., Mäkelä P. Drought tolerance in oats – physiological methods to assess varietal differences // *Proceedings of the International Conference at the Occasion of the 75th Anniversary of the Wageningen Agricultural University “Plant Production on the Threshold of a New Century”*. 1994. Vol. 61. P. 465–467. DOI: 10.1007/978-94-011-1158-4\_65.
24. Kebede G., Worku W., Feyissa F., Jifar H. Agro-morphological traits-based genetic diversity assessment on oat (*Avena sativa* L.) genotypes in the central highlands of Ethiopia // *All Life*. 2023. Vol. 16. Iss. 1. Art. No. 2236313. DOI: 10.1080/26895293.2023.2236313.
25. Zhang X., Liu W., Lv Y., Li T., Tang J., Yang X., Bai J., Jin X., Zhou H. Effects of drought stress during critical periods on photosynthesis characteristics and production performance of naked oat (*Avena nuda* L.). 2022. Vol. 12. No. 1. Art. No. 11199. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1135270/v1.
26. Федорова В. А., Наумова Н. А., Тарасенкова Ю. П., Поляков Д. П. Перспективные сорта ярового овса для возделывания в условиях полупустынной зоны Северного Прикаспия // *Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки»*. 2019. № 5. С. 335–341. DOI: 10.30914/2411-9687-2019-5-3-335-340.
27. Юсова О. А., Николаев П. Н., Аниськов Н. И., Сафонова И. В. Скрининг сортов овса омской селекции для условий южной лесостепи Западной Сибири // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*. 2021. Т. 16. № 1. С. 42–53. DOI: 10.22363/2312-797X-2021-16-1-42-53.
28. Зинатуллина А. Е. К вопросу о комплексной оценке засухоустойчивости пшеницы в полевых и лабораторных условиях // *Экобиотех*. 2022. Т. 5. № 3. С. 108–117. DOI: 10.31163/2618-964X-2022-5-3-108-117.
29. Varavkin V. A. Identification of drought resistance in winter wheat varieties in terms of xeromorphy and water-holding capacity // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science “Biological Technologies in Agriculture: from Molecules to Ecosystems”*. 2021. Vol. 839. Art. No. 042028. DOI: 10.1088/1755-1315/839/4/042028.
30. Бесалиев И. Н., Панфилов А. Л., Регер Н. С. Водоудерживающая способность растений сортов яровой мягкой пшеницы в засушливых условиях Оренбургского Приуралья // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. Т. 59. № 3. С. 20–25. DOI: 10.18286/1816-4501-2022-3-20-25.
31. Kapilan R., Vaziri M., Zwiazek J. J. Regulation of aquaporins in plants under stress // *Biol Res*. 2018. Vol. 51. Art. No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40659-018-0152-0>.
32. Пузина Т. И., Макеева И. Ю. Регуляция трансмембранного потока воды у проростков *Avena sativa* в условиях засухи // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Серия «Естественные науки»*. 2023. Т. 41. № 1. С. 93–102. DOI: 10.21685/2307-9150-2023-1-7.
33. Кабашов А. Д., Лоскутов И. Г., Власенко Н. М., Лейбович Я. Г., Маркова А. С., Филоненко З. В., Разумовская Л. Г. Сорта овса немчиновской селекции, включенные в Госреестр в последние годы (обзор) // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020. Т. 181. № 1. С. 110–118. DOI: 10.30901/2227-8834-2020-1-110-118.
34. Тулякова М. В., Баталова Г. А., Пермякова С. В., Кротова Н. В. Исходный материал овса пленчатого для селекции на урожайность // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33. № 7. С. 9–12. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10702.
35. Xie H., Li M., Chen Y., Zhou Q., Liu W., Liang G., Jia Z. Important physiological changes due to drought stress on oat // *Front. Ecol. Evol.* 2021. Vol. 9. Art. No. 644726. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.644726>.
36. Николаев П. Н., Юсова О. А., Васюкевич С. В., Аниськов Н. И., Сафонова И. В. Адаптивный потенциал сортов ярового овса по признаку «масса 1000 зерен» в условиях Омского Прииртышья // *Агрофизика*. 2019. № 2. С. 38–44. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.02.06
37. Асеева Т. А., Трифунтова И. Б. Агрономическая стабильность сортов и линий овса Дальневосточной селекции в условиях Среднего Приамурья // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2021. № 91. С. 12–17. DOI: 10.21515/1999-1703-91-12-17.
38. Gong W., Ju Z., Chai J., Zhou X., Lin D., Su W., Zhao G. Physiological and Transcription Analyses Reveal the Regulatory Mechanism in Oat (*Avena sativa*) Seedlings with Different Drought Resistance under PEG-Induced Drought Stress // *Agronomy*. 2022. No. 12. P. 1005. DOI: 10.3390/agronomy12051005.

39. Петункина Л. О., Свиркова С. В., Маевская Н. А., Старцев А. А. Физиологическая оценка устойчивости овса // Вестник Кемеровского государственного университета. 2012. Т. 52. № 4–1. С. 20–24.
40. Свиркова С. В., Старцев А. А., Заушинцева А. В. Реакция сортов овса на изменчивость метеофакторов на юге Западной Сибири // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 5.
41. Schonfeld M. A., Johnson B. F., Carver B. F., Mornhiweg D. W. Water relations in winter wheat as drought resistance indicator // Crop Sci. 1988. No. 28. P. 526–531. DOI: 10.2135/cropsci1988.0011183x002800030021x.
42. Pardossi A., Vernieri P., Tognoni F. Involvement of abscisic acid in regulating water status in *Phaseolus vulgaris* L. during chilling // Plant Physiol. 1992. No. 100. P. 1243–1250. DOI: 10.1104/pp.100.3.1243.

## References

43. Ciampitti I. A., Briat J. F., Gastal F., Lemaire G. Redefining crop breeding strategy for effective use of nitrogen in cropping systems // Commun Biol. 2022. Iss. 5. Art. No. 823. DOI: 10.1038/s42003-022-03782-2.
1. Voss-Fels K. P., Stahl A., Hickey L. T. Q&A: modern crop breeding for future food security // BMC Biol. 2019. Vol. 17. Art. No. 18. DOI: 10.1186/s12915-019-0638-4.
2. Sapega V. A., Tursumbekova G. Sh. Yield, ecological plasticity and stability of spring soft and durum wheat varieties in the southern forest steppe of Tyumen region // Agricultural Science Euro-North-East. 2020. Vol. 21. No. 2. P. 114–123. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.2.114-123.
3. Perfiliev N. V., Vyushina O. A., Vlasenko A. N. Efficiency of basic tillage systems in the cultivation of barley // Siberian Herald of Agricultural Science. 2021. Vol. 51. No. 1. P. 11–17. DOI: 10.26898/0370-8799-2021-1-1.
4. Moiseeva M. N., Eremin D. I. Influence of mineral fertilizers on the nitrogen accumulation in the grain and straw of oats in the forest-steppe of the Trans-Urals // Achievements of Science and Technology of AIC. 2023. Vol. 37. No. 2. P. 9–16. DOI: 10.53859/02352451\_2023\_37\_2\_9.
5. Evseev V. V., Mikolaychik I. N., Morozova L. A. Model of integrated resistant variety spring wheat for soil-climatic conditions of the Kurgan region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science “International Conference on Agricultural Science and Engineering”. 2021. Vol. 845. Art. No. 012059. DOI: 10.1088/1755-1315/845/1/012059.
6. Gulyanov Yu. A. Assessment of modern bioclimatic resources and prospects of yield growth in the post-virgin regions of the Urals and Western Siberia // Taurida Herald of the of Agrarian Sciences. 2020. Vol. 24. No. 4. P. 29–41. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-4-24-29-41.
7. Tobolova G. V., Ostapenko A. V. Biochemical study of the collections of sowing and byzantine oats // Bulletin of the State Agrarian University of the Northern Urals. 2013. Vol. 23. No. 4. P. 13–16.
8. Abugalieva A. I., Loskutov I. G., Savin T. V., Chudinov V. A. Evaluation of naked oat accessions from VIR collection for their qualitative characteristics in Kazakhstan // Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2021. Vol. 182. No. 1. P. 9–21. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-9-21.
9. Plant Abiotic Stress Physiology: Volume 2: Molecular Advancements // Ed. by Aftab T., Hakeem K. R. New York: Apple Academic Press, 2022. 322 p. DOI: 10.1201/9781003180579.
10. Wu J., Wang J., Hui W., Zhao F., Wang P., Su C., Gong W. Physiology of plant responses to water stress and related genes: a review // Forests. 2022. Vol. 13. No. 2. Art. No. 324. DOI: 10.3390/f13020324.
11. Guoqi W., Ma B.-L., Shi Y., Kui L., Chen W. Selection of oat (*Avena sativa* L.) drought-tolerant genotypes based on multiple yield-associated traits // J Sci Food Agric. 2023. Vol. 103. No. 9. P. 4380–4391. DOI: 10.1002/jsfa.12504.
12. ElBasyoni I., Saadalla M., Baenziger S., Bockelman H., Morsy S. Cell membrane stability and association mapping for drought and heat tolerance in a worldwide wheat collection // Sustainability. 2017. No. 9. Art. No. 1606. DOI: 10.3390/su9091606.
13. Sánchez-Martín J., Mur L. A. J., Rubiales D., Prats E. Targeting sources of drought tolerance within an *Avena spp.* collection through multivariate approaches // Planta. 2012. Vol. 236. No. 5. P. 1529–1545. DOI: 10.1007/s00425-012-1709-8.
14. Sayfullin R. G., Lobachev Yu. V., Beketova G. A., Kurasova L. G. Selection of varieties-standards for field experiments of the State Variety Testing Network // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2014. No. 6. P. 33–34.
15. Kayugina S. M., Eremin D. I. Dark gray forest soils humus state of the Northern Trans-Urals // Bulletin of KSAU. 2022. Vol. 187. No. 10. P. 35–42. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-10-35-42.
16. Kayugina S. M., Eremin D. I. Physicochemical properties of gray forest soils of the eastern outskirts of the Trans-Ural Plateau // Journal of Siberian Federal University. Series “Biology”. 2022. Vol. 15. No. 4. P. 471–490. DOI: 10.17516/1997-1389-0399.
17. Eremin D. I., Moiseeva M. N., Lyubimova A. V. The impact of mineral fertilizers on the consumption of mineral elements and the Siberian-bred oat grain // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science “Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Robotization and

Digitalization of Production in Russia and Abroad” (DAICRA 2021). 2022. Vol. 949. Art. No. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/949/1/012066.

18. Perfiliev N. V., Vyushina O. A. Influence of tillage systems on agrophysical parameters of dark grey forest soil in the Northern Trans-Urals // *Zemledelie*. 2023. No. 1. P. 27–31. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-1-27-31.

19. Methodology of State variety testing of agricultural crops. Issue 1. General part. Moscow: Gossortkommissiya, 1989. 329 p.

20. Ortega-Ortega A., Jiménez-Galindo J. C., Parra-Quezada R. Á., Jacobo-Cuellar J. L., Ruiz-Anchondo Teresita D. J., Salmerón-Zamora J. J., Zamudio-Flores P. B., Malvar R. A. Osmotic stress tolerance in forage oat varieties (*Avena sativa* L.) based on osmotic potential trials // *Agronomy Research*. 2023. Vol. 21. No. 1. P. 1200–1210. DOI: 10.15159/AR.23.005.

21. Karshiboev Kh. Kh., Siddikov R. E., Pokrovskaya M. N. Sustainability of total water content and coagulation temperature of proteins in the leaves of durum wheat in dryland area // *Agrarian science*. 2018. No. 11-12. P. 54–55. DOI: 10.32634/0869-8155-2018-320-11-54-55.

22. Peltonen-Sainio P., Mäkelä P. Drought tolerance in oats – physiological methods to assess varietal differences // *Proceedings of the International Conference at the Occasion of the 75th Anniversary of the Wageningen Agricultural University “Plant Production on the Threshold of a New Century”*. 1994. Vol. 61. P. 465–467. DOI: 10.1007/978-94-011-1158-4\_65.

23. Kebede G., Worku W., Feyissa F., Jifar H. Agro-morphological traits-based genetic diversity assessment on oat (*Avena sativa* L.) genotypes in the central highlands of Ethiopia // *All Life*. 2023. Vol. 16. Iss. 1. Art. No. 2236313. DOI: 10.1080/26895293.2023.2236313.

24. Zhang X., Liu W., Lv Y., Li T., Tang J., Yang X., Bai J., Jin X., Zhou H. Effects of drought stress during critical periods on photosynthesis characteristics and production performance of naked oat (*Avena nuda* L.) 2022. Vol. 12. No. 1. Art. No. 11199. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1135270/v1.

25. Fedorova V. A., Naumova N. A., Tarasenkova Yu. P., Polyakov D. P. Promising varieties of spring oats for cultivation in conditions of semi-arid areas of Northern Caspian Depression // *Vestnik of the Mari State University. Chapter “Agriculture. Economics”*. 2019. No. 5. P. 335–341. DOI: 10.30914/2411-9687-2019-5-3-335-340.

26. Yusova O. A., Nikolaev P. N., Aniskov N. I., Safonova I. V. Screening of oat cultivars developed in Omsk for conditions of the southern forest-steppe in Western Siberia // *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2021. Vol. 16. No. 1. P. 42–53. DOI: 10.22363/2312-797X-2021-16-1-42-53.

27. Zinatullina A. E. On the question about the complex evaluation of wheat drought resistance in field and laboratory conditions // *Ecobiotech*. 2022. Vol. 5. No. 3. P. 108–117. DOI: 10.31163/2618-964X-2022-5-3-108-117.

28. Varavkin V. A. Identification of drought resistance in winter wheat varieties in terms of xeromorphy and water-holding capacity // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science “Biological Technologies in Agriculture: from Molecules to Ecosystems”*. 2021. Vol. 839. Art. No. 042028. DOI: 10.1088/1755-1315/839/4/042028.

29. Besaliev I. N., Panfilov A. L., Reger N. S. Water-retaining capacity of plants of spring soft wheat varieties in dry conditions of Orenburg Cisurals // *Vesnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2022. Vol. 59. No. 3. P. 20–25. DOI: 10.18286/1816-4501-2022-3-20-25.

30. Kapilan R., Vaziri M., Zwiazek J. J. Regulation of aquaporins in plants under stress // *Biol Res*. 2018. Vol. 51. Art. No. 4. DOI: 10.1186/s40659-018-0152-0.

31. Puzina T. I., Makeeva I. Yu. Regulation of transmembrane water flow in *Avena sativa* seedlings under drought conditions // *University proceedings. Volga region. Natural sciences*. 2023. Vol. 41. No. 1. P. 93–102. DOI: 10.21685/2307-9150-2023-1-7.

32. Kabashov A. D., Loskutov I. G., Vlasenko N. M., Leibovich Ya. G., Markova A. S., Filonenko Z. V., Razumovskaya L. G. Oat cultivars developed at Nemchinovka and included into the State Register in recent years (review) // *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2020. Vol. 181. No. 1. P. 110–118. DOI: 10.30901/2227-8834-2020-1-110-118.

33. Tulyakova M. V., Batalova G. A., Permyakova S. V., Krotova N. V. Source material of chaffy oats for breeding for high yield // *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2019. Vol. 33. No. 7. P. 9–12. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10702.

34. Xie H., Li M., Chen Y., Zhou Q., Liu W., Liang G., Jia Z. Important physiological changes due to drought stress on oat // *Front. Ecol. Evol*. 2021. Vol. 9. Art. No. 644726. DOI: 10.3389/fevo.2021.644726.

35. Nikolaev P. N., Yusova O. A., Vasyukevich S. V., Aniskov N. I., Safonova I. V. Adaptive potential of spring oat varieties by “mass of 1000 grains” in the conditions of Omsk Priirtyshye // *Agrophysica*. 2019. No. 2. P. 38–44. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.02.06

36. Aseeva T. A., Trifuntova I. B. Agronomic stability of varieties and breeding lines of oats of the Far Eastern selection in the conditions of the Middle Amur Region // *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2021. No. 91. P. 12–17. DOI: 10.21515/1999-1703-91-12-17.

37. Gong W., Ju Z., Chai J., Zhou X., Lin D., Su W. Zhao G. Physiological and Transcription Analyses Reveal the Regulatory Mechanism in Oat (*Avena sativa*) Seedlings with Different Drought Resistance under PEG-Induced Drought Stress // *Agronomy*. 2022. No. 12. P. 1005. DOI: 10.3390/agronomy12051005.
38. Petunkina L. O., Svirikova S. V., Mayevskaya N. A., Startsev A. A. Physiological estimation of oats' resistance // *Bulletin of Kemerovo State University*. 2012. Vol. 52. No. 4-1. P. 20–24.
39. Svirikova S. V., Startsev A. A., Zaushintsena A. V. Reaction of oat varieties on the variability of weather factors in the south of Western Siberia // *Modern Problems of Science and Education*. 2016. No. 5.
40. Schonfeld M. A., Johnson B. F., Carver B.F., Mornhiweg D. W. Water relations in winter wheat as drought resistance indicator // *Crop Sci.* 1988. No. 28. P. 526–531. DOI: 10.2135/cropsci1988.0011183x002800030021x.
41. Pardossi A., Vernieri P., Tognoni F. Involvement of abscisic acid in regulating water status in *Phaseolus vulgaris* L. during chilling // *Plant Physiol.* 1992. No. 100. P. 1243–1250. DOI: 10.1104/pp.100.3.1243.

UDC 633.112.1

Eremin D. I., Eremina D. V., Lyubimova A. V.

### RELATIVE WATER CONTENT AND LEAF CELL MEMBRANE STABILITY INDEX AS SCREENING TOOLS FOR DROUGHT TOLERANCE IN OATS

**Summary.** *Summer droughts are becoming more frequent in the temperate zone, so the creation of drought-tolerant oat varieties is one of the key tasks for breeders. When evaluating the source material, it is important to use express methods that identify plant stress caused by abiotic factors. The aim of the research was to identify drought-resistant genotypes for oat breeding according to indicators characterizing the response of cell membranes to stress caused by soil moisture deficiency. The studies were carried out in 2020–2022 in a summer greenhouse, which excluded precipitation. Forty domestic varieties of oats from the collection of the Research Institute of Agriculture of the Northern Trans-Urals – branch of the Tyumen Scientific Center SB RAS were studied. Special attention was paid to such indicators as membrane stability index (MSI) and relative water content (RWC) in leaves. The experiment included the following options: 1. control – oats grew in optimal moisture conditions; 2. soil drought in tillering; 3. drought in flowering. It was found that, on average for the collection, the decrease in MSI during drought in tillering and flowering was 14 and 10%, respectively; the decrease in RWC – 12 and 10%. It was revealed that in the cultivars 'Privet', 'Sig', 'Faust', 'KROSS', 'Chizh', 'Lgovsky 82' and 'Ulov', the decrease in the cell membrane stability index and relative water content in leaves was less than 10% and 8%, respectively. Hence, these cultivars can be recommended for breeding for drought resistance. In cultivars 'Egorych', 'Taezhnik', 'Dedal', 'Desant', 'Pokrovsky 9' and 'Pesets', the decrease in MSI and RWC was more than 16 and 12%, respectively. We identified some varieties in which soil drought during tillering caused severe stress, but it was absent during later drought. It had been established that the correlation between the absolute values of MSI, RWC and crop structure elements was very weak. A close relationship was noted between the relative decrease in these indicators and mass of 1000 grains –  $r = 0.81$  and  $0.75$ , respectively. It is recommended to use the membrane stability index and the relative water content in leaves in the selection of parental forms and analysis of hybrid combinations in the process of drought-tolerant oat varieties breeding.*

**Keywords:** *oats (*Avena sativa* L.), plant stress, oat drought tolerance, membrane stability index, soil drought, disturbance of biochemical reactions, parental forms.*

Ерёмин Дмитрий Иванович, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр сибирского отделения РАН»»; Россия, 625501, Тюменская область, п. Московский, ул. Бурлаки, 2; e-mail: soil-tyumen@yandex.ru.

Ерёмина Диана Васильевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»; Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Республики, 7; e-mail: ereminadv@gausz.ru.

Любимова Анна Валерьевна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией геномных исследований в растениеводстве. ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр сибирского отделения РАН»»; Россия, 625501, Тюменская область, пос. Московский, ул. Burlaki, 2; e-mail: ostapenkoav88@yandex.ru.

Eremin Dmitry Ivanovich, Dr. Sc. (Biol.), associate professor, leading researcher at the Laboratory of genomic research in plant breeding of the Research Institute of Agriculture of the Northern Trans-Urals – branch of the Tyumen Scientific Center SB RAS; 2, Burlaki str., Moskovsky village, Tyumen region, 625501, Russia; e-mail: soil-tyumen@yandex.ru.

Eremina Diana Vasilevna, Cand. Sc. (Agr.), associate professor at the Northern Trans-Ural State Agricultural University; 7, Respubliki str., Tyumen, 625003, Russia; e-mail: ereminadv@gausz.ru.

Lyubimova Anna Valeryevna, Cand. Sc. (Biol.), head of the Laboratory of genomic research in plant breeding of the Research Institute of Agriculture of the Northern Trans-Urals – branch of the Tyumen Scientific Center SB RAS; 2, Burlaki str., Moskovsky village, Tyumen region, 625501, Russia; e-mail: ostapenkoav88@yandex.ru.

*Дата поступления в редакцию – 28.08.2023.*

*Дата принятия к печати – 21.09.2023*