

УДК 631.531:635.758

DOI 10.18286/1816-4501-2021-4-66-72

ДИНАМИКА РОСТА ЗАРОДЫША РАЗНОКАЧЕСТВЕННЫХ СЕМЯН УКРОПА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Бухаров Александр Федорович, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник отдела селекции и семеноводства

Балеев Дмитрий Николаевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник

Еремина Надежда Александровна, младший научный сотрудник

Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО)

140153, Московская область, Раменский район, д. Верея, стр. 500, e-mail: afb56@mail.ru

Ключевые слова: укроп, гетероспермия, рост зародыша, температура

Температура является важнейшим абиотическим фактором, критические значения которого могут оказывать негативное влияние на разных этапах роста и развития растений. В работе показано действие этого фактора на рост зародыша разнокачественных семян укропа, полученных с разных порядков ветвления. Экспериментальные данные свидетельствуют, что начальные размеры зародыша первого порядка ветвления на 34,6 % выше второго. Отмечено значительное варьирование морфометрических параметров семян укропа, в том числе характеризующих соотношение зародыша, эндосперма и семени как в пределах отдельных порядков, так и растения в целом. Получены новые данные о влиянии высоко- и низкотемпературного факторов на рост зародыша семян укропа, полученных с разных порядков ветвления. Зародыши первого и второго порядка обнаружили значительную чувствительность к продолжительному непрерывному действию повышенных температур в период набухания. Зародыши семян второго порядка оказались более чувствительны к действию температурного стресса и более резко реагировали на него. Рост зародыша и прорастание семян замедлялись в той или иной степени при повышении температуры набухания до 30-35°C для первого порядка и 25-30°C для второго порядка. Физиологическим ответом на непрерывное действие повышенных температур (30-40°C) является прогрессирующее угнетение роста зародыша. Максимальная температура, допускающая рост зародыша, существенно различается для разных порядков ветвления. При приближении к критической температуре (40°C) различия нивелируются. Достоверные ($p < 0,001$) различия динамики роста зародыша с контролем (20°C) наблюдали только при температуре ниже 10°C для семян первого порядка и 15°C- для семян второго.

Введение

Недоразвитый зародыш, характерный для семян большинства зонтичных культур, является одной из главных причин, определяющих их качество. Так, длительное прорастание семян овощных зонтичных и связанная с этим изреженность всходов, обусловлены необходимостью доразвития зародыша и преодоления покоя в процессе проращивания [1-3]. Поскольку для линейных размеров зародыша, как и других признаков, характерна значительная изменчи-

вость, это заслуживает тщательного изучения [4, 5].

В процессе прорастания семян именно недоразвитый зародыш испытывает сильное негативное влияние аномальных факторов внешней среды, которые могут существенно сдерживать темпы его роста и, в конечном счете, снизить полевую всхожесть [3, 5]. Температура – важнейший из абиотических факторов, под действием которой многие сельскохозяйственные культуры, в том числе и сельдерейные, могут

испытывать стресс на разных этапах онтогенеза [6 - 9]. Изменчивость погоды, высокая вероятность проявления аномальной температуры делают актуальной задачу изучения адаптивных реакций растений на этот фактор в период прорастания семян. Для большинства семян оптимальной принято считать температуру 15 - 30 °С, а максимальной - от 30 до 40 °С. Снижение или повышение температуры относительно оптимальной на 10 – 15°С приводит к изменению метаболических и ростовых процессов. Постоянная температура набухания вблизи 40°С для семян многих видов оказывается критической и затрудняет прорастание. Значение температуры для прорастания семян и роста зародыша, в том числе на фоне засоления и водного дефицита, было показано в ряде работ, выполненных на диких видах сельдерейных [10 - 14]. При изучении процесса прорастания семян очень важно понятие кардинальных температур [14].

Поэтому изучение реакции зародышей семян укропа на температурные режимы прорастания, в том числе сверхоптимальные, представляется актуальным. Ранее нами были отмечены особенности роста зародыша в процессе прорастания выровненных партий семян укропа и других зонтичных, а также рассчитаны параметры, характеризующие динамику этого процесса [5], которые согласуются с литературными данными [14-16]. В данном исследовании впервые изучено действие температурного стрессора на рост зародыша семян укропа, сформировавшихся на разных порядках ветвления.

Цель исследования - изучить изменчивость морфологических параметров семян укропа, сформировавшихся на первом и втором порядках, и последующий рост зародыша в условиях температурного стресса.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили во Всероссийском научно-исследовательском институте овощеводства – филиал ФГБНУ ФНЦО. Объект исследований - семена укропа (*A. graveolens* L.) сорта Кентавр, выращенные в 2016 – 2018 годах. Прорастивание проводили в термостате ТС 1/80 в чашках Петри на фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой. Испытано 9 температурных режимов от 2 до 40 °С. Продолжительность опыта – 21 сутки. Длину семени и эндосперма измеряли штангенциркулем, а длину зародыша с помощью микроскопа Микромед 1, видеоокуляра DCM 300 MD (×40) и программы Score Photo (Image Software V. 3.1.386). Критическую длину зародыша определяли в момент

расщепления семенной оболочки, но до появления корешка [17]. Кривые роста построены на основе логистической регрессии временных рядов. Для характеристики динамики роста зародыша рассчитывали четыре параметра: *b* – наклон кривой (соответствует скорости роста), *c* – нижняя асимптота (соответствует начальной длине зародыша партии семян), *d* – верхняя асимптота (соответствует длине зародыша при максимальном прорастании партии), *e* – время (T_{50}), затрачиваемое на увеличение длины зародыша до 50% от максимального размера [18-20]. Взаимосвязь между параметрами оценивали с помощью коэффициента корреляции Пирсона при $p \leq 0,05$.

Результаты исследований

Масса 1000 семян, полученных с первого порядка, составляла 1,50 - 1,59 г, а второго порядка – 1,32 - 1,41 г. Средняя длина семян первого порядка была $4,04 \pm 0,013$ мм, длина эндосперма $3,58 \pm 0,012$ мм, что соответственно на 9,7 и 10,3 % больше этих показателей у семян второго порядка. Зародыш в семенах соцветий первого порядка имел длину $1,04 \pm 0,003$ мм, существенно ($p < 0,001$) на 0,36 мм (34,6%) больше, чем в зонтиках второго ($0,69 \pm 0,02$ мм) порядка. Относительный размер зародыша к эндосперму ($I_{3/3}$), рассчитанный по методике [21], показал существенное преимущество семян первого порядка ($0,31 \pm 0,01$) в сравнении со вторым ($0,23 \pm 0,01$) порядком.

Исследования основаны на гипотезе, что гетероморфные семена укропа будут по-разному реагировать на действие теплового фактора в процессе прорастания. Предполагалось, что более развитый зародыш способен лучше преодолевать температурный стресс. Исследовано действие длительного теплового стресса на рост зародыша в зависимости от порядка ветвления. В итоге было обнаружено, что зародыши второго порядка более чувствительны к действию теплового стресса. Это дает основание предполагать, что размер зародыша играет ключевую роль в способности семян укропа противостоять тепловому стрессу при прорастании.

При действии пониженной температуры достоверные ($p < 0,001$) различия динамики роста зародыша с контролем (20°С) наблюдали только при температуре ниже 10°С для семян первого порядка и 15°С - для семян второго (рис. 1). При 5°С различия в темпах роста зародышей первого и второго порядка проявлялись сильнее и достигали максимального разрыва при

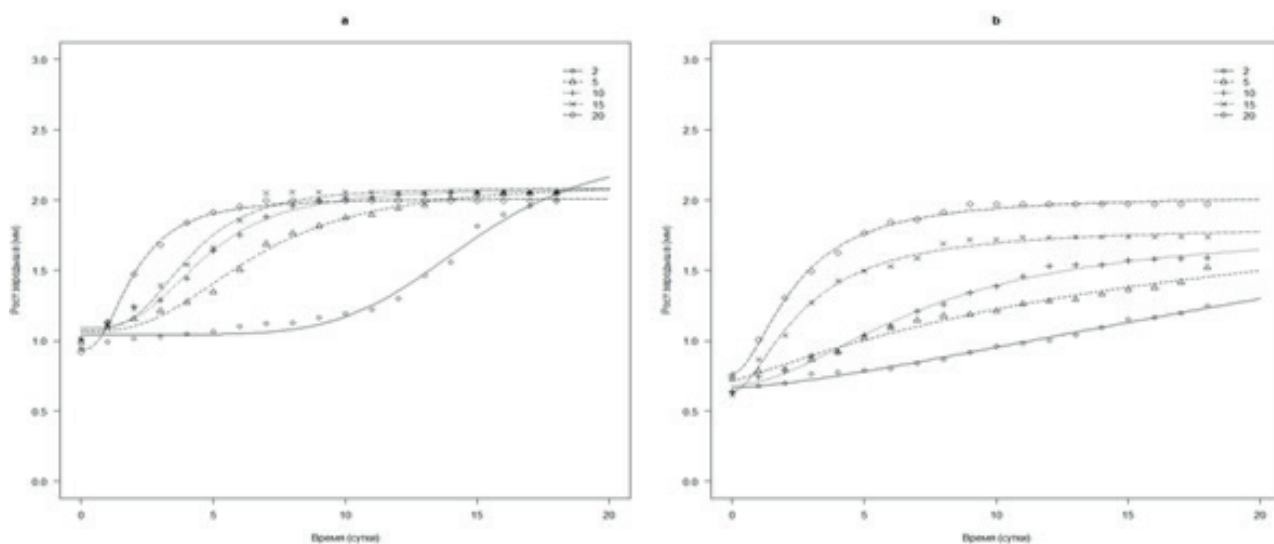


Рис. 1 - Влияние пониженной температуры и места формирования семян на динамику роста зародыша: *a* – первый и *b* – второй порядок

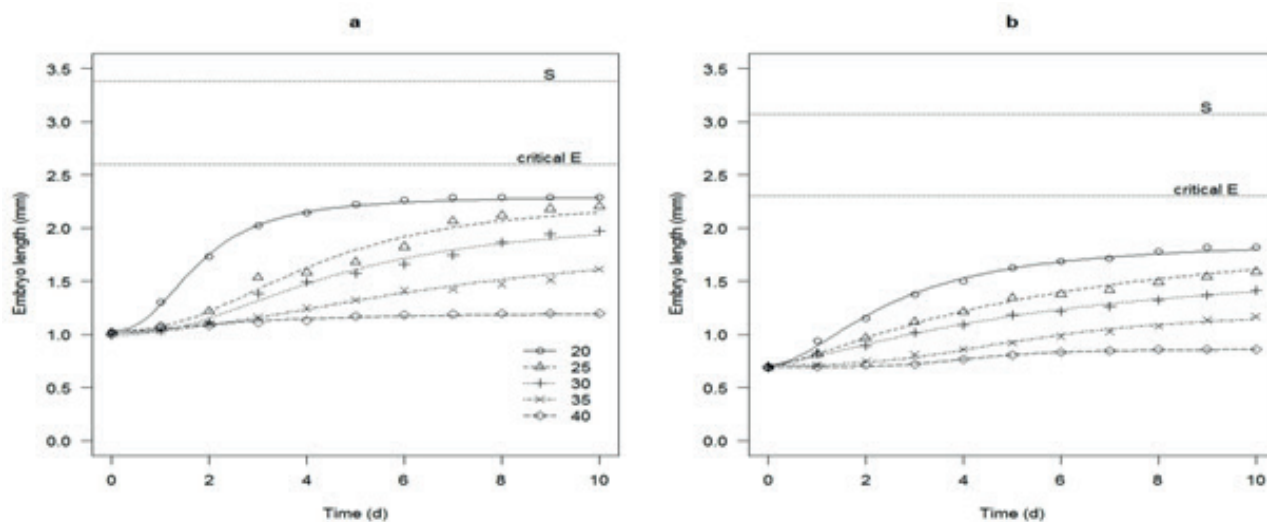


Рис. 2 - Влияние повышенной температуры и места формирования семян на динамику роста зародыша: *a* – первый и *b* – второй порядок

снижении температуры до минимальной (2°C). В целом зародыши второго порядка ветвления оказались более чувствительны к низкотемпературному стрессу.

При увеличении температуры выше оптимальной (20°C) темпы роста зародышей как первого, так и второго порядка ветвления также снижались (рис. 2). Время, необходимое для достижения зародышем первого порядка критического размера при 25 и 30°C по сравнению с 20°C, возрастало на $2,4 \pm 0,3$ ($p < 0,001$) и $5,3 \pm 0,9$ суток ($p < 0,001$), а для зародышей второго порядка на $2,9 \pm 0,8$ ($p < 0,001$) и $3,1 \pm 1,2$ суток ($p = 0,007$) соответственно. При действии более агрессивной температуры (35°C) увеличивалась степень термочувствительности зародышей первого и особенно второго порядка.

Увеличение температуры проращивания до 40°C приводило к резкому ослаблению ростовых процессов ($p < 0,001$) и спустя 4-5 суток происходила полная остановка роста зародышей как первого, так и второго порядка. Критическая температура, при которой возможен рост зародыша первого порядка, составляет $40 \pm 0,4^\circ\text{C}$, а второго – $38 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ($p < 0,001$). Таким образом, выявлена повышенная чувствительность зародышей второго порядка ветвления и к сверхоптимальной температуре.

Максимальная длина зародыша под влиянием пониженной температуры изменялась не существенно, за исключением крайних вариантов (2°C и 5°C), когда, несмотря на сдержанный рост, этот показатель, особенно для семян второго порядка имел наибольшее значение (рис. 3).

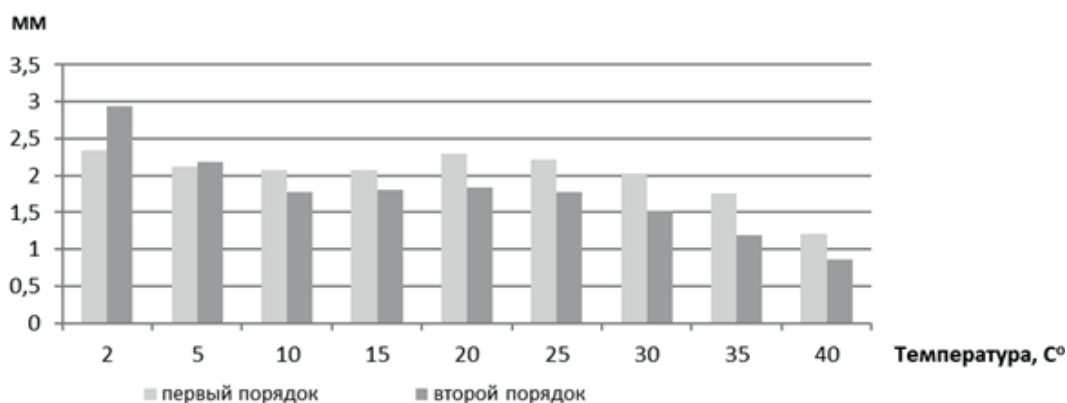


Рис. 3 - Влияние температурного фактора на параметр d (длина зародыша в период максимального прорастания семян), мм

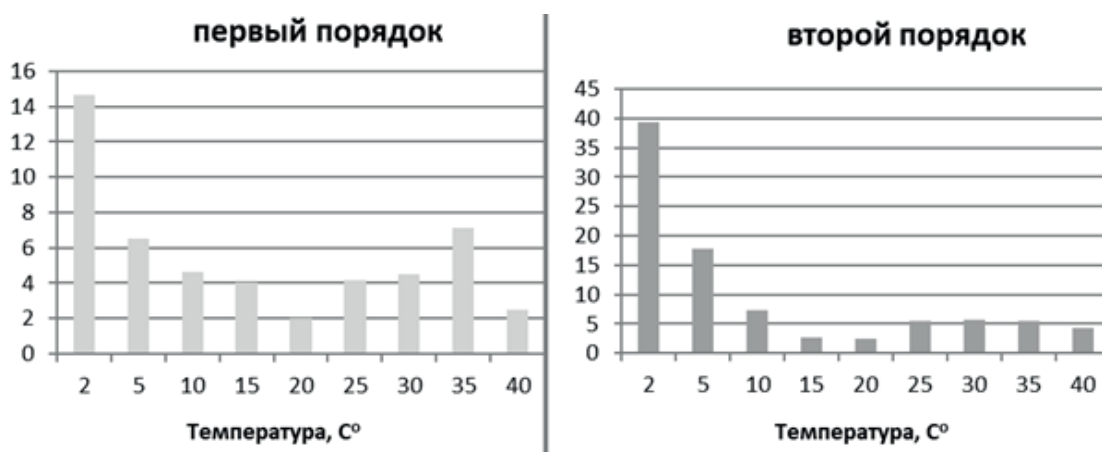


Рис. 4 - Влияние температурного фактора на параметр T_{50} (время, за которое зародыш достигает 50% размера от максимальной длины), сут.

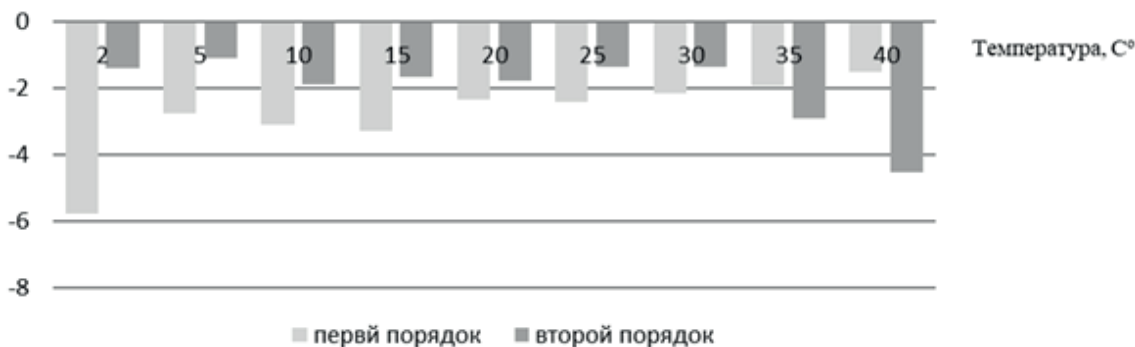


Рис. 5 - Влияние температурного фактора на параметр b (тангенс угла наклона кривой роста) в зависимости от порядка ветвления

При повышении температуры с 20°C до 40°C отмечена явная тенденция снижения абсолютной и относительной длины зародышей (при максимальном прорастании семян) первого порядка на 47,4 и 47,0%, а зародышей второго порядка, которые оказались более чувствительны, на 54,5 и 54,8 % соответственно.

Время, за которое зародыш достигает 50% размера от максимальной длины (T_{50}), имело

максимальное значение при 2 °C для зародышей как первого, так и второго порядка. При более высокой температуре 5 - 15 °C показатель T_{50} постепенно снижался, тем не менее существенно ($p < 0,001$) отличался от контроля (рис. 4).

При увеличении температуры до 25 и 35°C по сравнению с 20°C время, за которое зародыш первого порядка достигал 50% размера от максимальной длины,

возрастало на $2,4 \pm 0,3$ ($p < 0,001$) и $5,3 \pm 0,9$ суток ($p < 0,001$), а для зародышей второго порядка - на $2,9 \pm 0,8$ ($p < 0,001$) и $3,1 \pm 1,2$ суток ($p = 0,007$) соответственно. При температуре 40°C через 4-5 суток рост зародышей первого и второго порядка полностью останавливался.

Параметр b (тангенс угла наклона кривой в фазу экспоненциального роста), характеризующий скорость роста зародыша, изменялся под влиянием температуры явно неоднозначно (рис. 5). Для зародышей семян первого порядка было характерно минимальное значение этого показателя при $+2^\circ\text{C}$ и постепенное его увеличение с повышением температуры прорастания. В то время, как зародыши в семенах второго порядка имели минимальное значение этого параметра при $+40^\circ\text{C}$ и максимум при $+2^\circ\text{C}$.

В экстремальных условиях варьирование морфометрических параметров семян эффективно повышает выживаемость потомства и увеличивает репродуктивный успех [21, 22]. Гетероморфность семян, выработанная в процессе эволюции, в природе на адаптивном уровне играет положительную роль, однако, в сельскохозяйственной практике, она, как правило, приводит к неоднородности прорастания семян и созревания урожая, а, в конечном счете, к снижению качества продукции [23].

Заключение

Начальный размер зародыша, закладываемый в процессе формирования семян на материнском растении (в зависимости от порядка ветвления), влияет на последующий эмбриональный этап его развития. До наклевывания зародышу укропа необходимо увеличиться почти вдвое от первоначальной длины. Снижение, как и повышение температуры относительно оптимальной (20°C), негативно отражается на темпах роста зародышей во время прорастания семян как первого, так и второго порядка. Однако, зародыши второго порядка менее развиты и более чувствительны к действию высокой и низкой температур, что тормозит их рост при прорастании. Полученная информация является основой для совершенствования методов исследования разнокачественности семян. Анализ роста недоразвитых зародышей представляет интерес как для селекционной практики (при отборе на холодо- и жаростойкость), так и для совершенствования технологии предпосевной подготовки (подращивания - праймирования) семян.

Библиографический список

1. Hawkins, T. S. Morphophysiological dormancy in seeds of three eastern North American sanicula species (Apiaceae subf. Saniculoideae): evolutionary implications for dormancy break / T. S. Hawkins, C. C. Baskin, J. M. Baskin // *Plant Species Biology*. – 2010. – 25. – P. 103–113. - doi.org/10.1111/j.1442-1984.2010.00273.x.
2. Vandeloos, F. Relative embryo length as an adaptation to habitat and life cycle in Apiaceae / F. Vandeloos, S. B. Janssens, R. J. Probert // *New Phytologist*. – 2012. – 195. – P. 479–487. - doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04172.x.
3. Бухаров, А. Ф. Возникновение индуцированного покоя у семян овощных зонтичных культур под действием аллелопатически активных веществ / А. Ф. Бухаров, Д. Н. Балеев // *Сельскохозяйственная биология*. – 2016. – Т. 51, № 5. – С. 714–721.
4. Effects of salinity on the growth, physiology and relevant gene expression of an annual halophyte grown from heteromorphic seeds / J. Cao, X. Y. Lv, L. Chen, J. J. Xing, H. Y. Lan // *AoB Plants*. – 2015. – 7. – P.112. - doi.org/10.1093/aobpla/plv112.
5. Морфометрия зародыша как элемент системы тестирования качества семян укропа / А. Ф. Бухаров, Д. Н. Балеев, М. И. Иванова, А. Р. Бухарова [и др.] // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. – 2018. – № 3(72). – С. 63–66. - doi: 10.21.515/1999-1703-72-63-66
6. Wen, B. Effects of high temperature and water stress on seed germination of the invasive species Mexican sunflower / B. Wen // *PLoS One*. – 2015. – 10. – P. e0141567. - doi.org/10.1371/journal.pone.0141567.
7. Effect of temperature on seed germination in spinach (*Spinacia oleracea*) / J. Chitwood, A. Shi, M. Evans, C. Rom [et al.] // *Hort Science*. – 2016. – 51. – P. 1475–1478. - doi.org/10.21273/hortsci11414-16.
8. Nascimento, W. M. Carrot seed germination and respiration at high temperature in response to seed maturity and priming / W. M. Nascimento, D. J. Huber, D. J. Cantliffe // *Seed Science and Technology*. – 2013. – 41. – P. 164–169. - doi.org/10.15258/sst.2013.41.1.19.
9. Nascimento, W. M. Carrot seed germination and ethylene production at high temperature in response to seed osmopriming / W. M. Nascimento, D. J. Huber, D. J. Cantliffe // *Horticultura Brasileira*. – 2013. – 31. – P. 554–558. - doi.org/10.1590/s0102-05362013000400008.

10. Tariq, M. An overview on the small heat shock proteins / M. Tariq, S. Waseem, H. A. Bilal // African Journal of Biotechnology. - 2010. – 9. – P. 927-949. - doi.org/10.5897/ajb09.006.

11. Zehtab-Salmasi, S. Effects of salinity and temperature on germination of dill (*Anethum graveolens* L.) / S. Zehtab-Salmasi // Plant Sci. Res. - 2008. – 1. – P. 27-29.

12. Vandeloos, F. Seed dormancy and germination of the European Chaerophyllum temulum (Apiaceae), a member of a trans-Atlantic genus / F. Vandeloos, N. Bolle, J. A. Van Assche // Ann. Bot. – 2007. – 100. – P. 233-239. - doi:10.1093/aob/mcm090.

13. Vandeloos, F. Morphological and physiological dormancy in seeds of *Aegopodium podagraria* (Apiaceae) broken successively during cold stratification / F. Vandeloos, N. Bolle, J. A. Van Assche // Seed Science Research. – 2009. – 19. – P. 115-123. - doi.org/10.1017/s0960258509301075.

14. Cardinal temperatures for germination in three millet species / B. Kamkar, A. Koochaki, M. N. Mahalati, M. P. R. Moghaddam // Asian J. plant Sci. - 2006. – 5. – P. 316-319. - doi.org/10.3923/ajps.2006.316.319.

15. Berti, M. T. Seed germination response of cuphea to temperature / M. T. Berti, B. L. Johnson // Ind. Crops Prod. - 2008. – 27. – P. 17-21. - doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.05.004.

16. Germination properties of some wild medicinal plants from Iran / M. Bannayan, F. Nadjafi, M. Rastgoo, L. Tabrizi // Seed Sci. Technol. - 2006. – 28. – P. 80-86.

17. Vandeloos, F. Temperature, requirements

for seed germination and seedling development determine timing of seedling emergence of three monocotyledonous temperate forest geophytes spring / F. Vandeloos, J. A. Van Assche // Annals of Botany. – 2008. – 102. – P. 865–875. - doi.org/10.1093/aob/mcn165.

18. Ritz, C. Analysis of germination data from agricultural experiments / C. Ritz, C. B. Pipper, J. C. Streibig // European Journal of Agronomy. – 2013. – 45. – P. 1–6. - doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.003.

19. Dose-response analysis using R / C. Ritz, F. Baty, J. C. Streibig, D. Gerhard // PLoS ONE. – 2015. – 10. – P. e0146021. - doi.org/10.1371/journal.pone.0146021.

20. Бухаров, А. Ф. Кинетика прорастания семян. Методы исследования и параметры / А. Ф. Бухаров, Д. Н. Балеев, А. Р. Бухарова // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. - 2017. - № 2. - С. 5-19.

21. Necajeva, J. Seed dormancy and germination of an endangered coastal plant *Eryngium maritimum* (Apiaceae) / J. Necajeva, G. Levinsh // Estonian Journal of Ecology. – 2013. – 62. – P. 150–161. - doi.org/10.3176/eco.2013.2.06.

22. Synthesis: The role of adaptive trans-generational plasticity in biological invasions of plants / A. R. Dyer, C. S. Brown, E. K. Espeland, J. K. McKay, H. Meimberg, K. J. Rice // Evolutionary Applications. – 2010. – 3. – P. 179–192. - doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00118.x.

23. Gharoobi, B. Effects of Seed size on seedlings characteristics of five barley cultivars / B. Gharoobi // Iranian Journal of Plant Physiology. – 2011. – 1. – P. 265-270.

CORCULE GROWTH DYNAMICS OF VARIOUS-QUALITY DILL SEEDS DEPENDING ON TEMPERATURE

Bukharov A.F., Baleev D.N., Eremina N.A.

All-Russian Research Institute of Vegetable Growing - a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center of Vegetable Growing" 140153, Moscow region, Ramensky district, Vereya v, bldg. 500, e-mail: afb56@mail.ru

Keywords: dill, heterospermy, corcule growth, temperature

Temperature is one of the most important abiotic factor, the critical values of which can have a negative impact at different stages of plant growth and development. The work shows the effect of this factor on corcule growth of different quality dill seeds obtained from different tillering parts. Experimental data indicate that the initial sizes of a corcule of the first tillering part are 34.6% higher than the second. A significant variation in morphometric parameters of dill seeds was noted including those characterizing the correlation of the corcules, endosperm and seed, both within individual parts and the plant as a whole. New data on the influence of high and low temperature factors on corcule growth of dill seeds from different tillering parts were obtained. First and second part corcules showed significant sensitivity to prolonged continuous exposure to increased temperatures during the upswelling period. Second-part seed corcules appeared to be more sensitive to temperature stress and reacted to it more explicitly. The corcule growth and germination of seeds slowed down in case of increase of the upswelling temperature to 30-35 ° C for the first part and 25-30 ° C for the second one. The physiological response to continuous increased temperatures (30-40 ° C) is a progressive inhibition of the corcule growth. The maximum temperature which allows corcule growth differs significantly for different tillering parts. When approaching the critical temperature (40 ° C), the differences are leveled. Significant ($p < 0.001$) differences in dynamics of corcule growth in comparison with the control (20 ° C) were observed only at temperatures below 10 ° C for seeds of the first part and 15 ° C for seeds of the second part.

Bibliography:

1. Hawkins, T. S. Morphophysiological dormancy in seeds of three eastern North American *Sanicula* species (Apiaceae subf. Saniculoideae): evolutionary implications for dormancy break / T. S. Hawkins, C. C. Baskin, J. M. Baskin // Plant Species Biology. - 2010. - 25. - P. 103-113. - doi.org/10.1111/j.1442-1984.2010.00273.x.

2. Vandeloos, F. Relative embryo length as an adaptation to habitat and life cycle in Apiaceae / F. Vandeloos, S. B. Janssens, R. J. Probert // *New Phytologist*. - 2012. - 195. - P. 479–487. - doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04172.x.
3. Bukharov, A.F. The emergence of induced dormancy of seeds of vegetable umbrella crops under the influence of allelopathically active substances / A.F. Bukharov, D.N. Baleev // *Agricultural biology*. - 2016. - V. 51, №5. - P. 714-721.
4. Effects of salinity on the growth, physiology and relevant gene expression of an annual halophyte grown from heteromorphic seeds / J. Cao, X. Y. Lv, L. Chen, J. J. Xing, H. Y. Lan // *AoB Plants*. - 2015. - 7. - P.112. - doi.org/10.1093/aobpla/plv112.
5. Morphometry of the corcule as an element of the system for testing the quality of dill seeds / A.F. Bukharov, D.N. Baleev, M.I. Ivanova, A.R. Bukharova [and others] // *Scientific works of Kuban State Agrarian University*. - 2018. - №3 (72). - P. 63-66. - doi: 10.21.515 / 1999-1703-72-63-66
6. Wen, B. Effects of high temperature and water stress on seed germination of the invasive species Mexican sunflower / B. Wen // *PLoS One*. - 2015. — 10. - P. e0141567. - doi.org/10.1371/journal.pone.0141567.
7. Effect of temperature on seed germination in spinach (*Spinacia oleracea*) / J. Chitwood, A. Shi, M. Evans, C. Rom [et al.] // *Hort Science*. - 2016. - 51. - P. 1475-1478. - doi.org/10.21273/hortsci11414-16.
8. Nascimento, W. M. Carrot seed germination and respiration at high temperature in response to seed maturity and priming / W. M. Nascimento, D. J. Huber, D. J. Cantliffe // *Seed Science and Technology*. - 2013. - 41. - P. 164-169. - doi.org/10.15258/sst.2013.41.1.19.
9. Nascimento, W. M. Carrot seed germination and ethylene production at high temperature in response to seed osmopriming / W. M. Nascimento, D. J. Huber, D. J. Cantliffe // *Horticultura Brasileira*. - 2013. - 31. - R. 554–558. - doi.org/10.1590/s0102-05362013000400008.
10. Tariq, M. An overview on the small heat shock proteins / M. Tariq, S. Waseem, H. A. Bilal // *African Journal of Biotechnology*. - 2010. — 9. - P. 927-949. - doi.org/10.5897/ajb09.006.
11. Zehrab-Salmasi, S. Effects of salinity and temperature on germination of dill (*Anethum graveolens* L.) / S. Zehrab-Salmasi // *Plant Sci. Res.* - 2008. - 1. - P. 27-29.
12. Vandeloos, F. Seed dormancy and germination of the European *Chaerophyllum temulum* (Apiaceae), a member of a trans-Atlantic genus / F. Vandeloos, N. ... Bolle, J. A. Van Assche // *Ann. Bot.* - 2007. - 100. - P. 233-239. - doi: 10.1093/aob/mcm090.
13. Vandeloos, F. Morphological and physiological dormancy in seeds of *Aegopodium podagraria* (Apiaceae) broken successively during cold stratification / F. Vandeloos, N. Bolle, J. A. Van Assche // *Seed Science Research*. - 2009. - 19. - P. 115-123. - doi.org/10.1017/s0960258509301075.
14. Cardinal temperatures for germination in three millet species / B. Kamkar, A. Koochaki, M. N. Mahalati, M. P. R. Moghaddam // *Asian J. plant Sci.* - 2006. — 5. - P. 316-319. - doi.org/10.3923/ajps.2006.316.319.
15. Berti, M. T. Seed germination response of cuphea to temperature / M. T. Berti, B. L. Johnson // *Ind. Crops Prod.* - 2008. - 27. - P. 17-21. - doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.05.004.
16. Germination properties of some wild medicinal plants from Iran / M. Bannayan, F. Nadjafi, M. Rastgoo, L. Tabrizi // *Seed Sci. Technol.* - 2006. - 28. - P. 80-86.
17. Vandeloos, F. Temperature, requirements for seed germination and seedling development determine timing of seedling emergence of three monocotyledonous temperate forest geophytes spring / F. Vandeloos, J. A. Van Assche // *Annals of Botany*. - 2008. - 102. - P. 865–875. - doi.org/10.1093/aob/mcn165.
18. Ritz, C. Analysis of germination data from agricultural experiments / C. Ritz, C. B. Pipper, J. C. Streibig // *European Journal of Agronomy*. - 2013. - 45. - P. 1–6. - doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.003.
19. Dose-response analysis using R / C. Ritz, F. Baty, J. C. Streibig, D. Gerhard // *PLoS ONE*. - 2015. — 10. - P. e0146021. - doi.org/10.1371/journal.pone.0146021.
20. Bukharov, A. F. Kinetics of seed germination. Research methods and parameters / A. F. Bukharov, D. N. Baleev, A. R. Bukharova // *Vestnik of Timiryazev Agricultural Academy*. - 2017. - №2. - P. 5-19.
21. Necajeva, J. Seed dormancy and germination of an endangered coastal plant *Eryngium maritimum* (Apiaceae) / J. Necajeva, G. Ievinsh // *Estonian Journal of Ecology*. - 2013. - 62. - P. 150-161. - doi.org/10.3176/eco.2013.2.06.
22. Synthesis: The role of adaptive trans-generational plasticity in biological invasions of plants / A. R. Dyer, C. S. Brown, E. K. Espeland, J. K. McKay, H. Meimberg, K. J. Rice // *Evolutionary Applications*. - 2010. - 3. - P. 179-192. - doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00118.x.
23. Gharoobi, B. Effects of Seed size on seedlings characteristics of five barley cultivars / B. Gharoobi // *Iranian Journal of Plant Physiology*. - 2011. - 1. - P. 265-270.