



<https://doi.org/10.70728/a.series.tab.v08.i05.036>

UDK: 633.511:581.1: 631.8

ZAMONAVIY GENOM TAHRIRLASH TEXNOLOGIYALAR ORQALI SO'YANING QURG'OQCHILIKKA CHIDAMLILIGINI OSHIRISH.

A.A.Murodov¹, M.S.Ayubov¹, B.O. Mamajonov¹, A.N.Yusupov¹, N.Sh.Obidov¹,
Z.X.Bashirxonov¹, Y.A.Muhammedov¹.

¹O'zR FA Genomika va bioinformatika markazi, Qibray, O'zbekiston
email: murodov95anvar@gmail.com

Annotatsiya. So'ya (*Glycine max* L) o'simligi qishloq xo'jaligi va oziq-ovqat sanoatida muhim o'simliklardan biri bo'lib, uning doni inson salomatligi uchun zarur bo'lgan oqsil va yog' moddalarining asosiy manbalaridan biridir. Iqlim o'zgarishlari, qurg'oqchilik ko'plab o'simliklar qatorida so'yaning ham rivojlanishi va hosildorligiga salbiy ta'sir ko'rsatmoqda. Zamonaviy genom tahrirlash usullari yordamida qurg'oqchilik sharoitida ham normal rivojlanib, hosildorligini saqlagan so'ya navlarini yaratish imkoni mavjud. Ayniqsa, genom tahrirlashning CRISPR/Cas9 usuli o'zining osonligi, qulayligi va kam mablag' talab qilganligi sababli hozirda turli tadqiqotlarda keng qo'llanilmoqda. Ushbu maqolada CRISPR/Cas9 texnologiyasi yordamida so'ya o'simligining qurg'oqchilikka chidamliligini oshirish borasida olib borilgan tadqiqotlarni tahlil qilish orqali muammolar va kelajakdagi istiqbollarni yoritib beriladi.

Kalit so'zlar: So'ya (*Glycine max* L), qurg'oqchilik, CRISPR/Cas9.

Аннотация. Соя (*Glycine max* L) — одно из важных растений в сельском хозяйстве и пищевой промышленности, а её зерно является одним из основных источников белка и жира, необходимых для здоровья человека. Изменение климата и засуха оказывают негативное воздействие на развитие и урожайность сои, как и многих других растений. С помощью современных методов редактирования генома стало возможным создание сортов сои, которые нормально развиваются и сохраняют урожайность даже в условиях засухи. В частности, метод редактирования генома CRISPR/Cas9 в настоящее время широко используется в различных исследованиях благодаря своей простоте, удобству и низкой стоимости. В данной статье анализируются исследования, проведенные по

повышению засухоустойчивости растений сои с использованием технологии CRISPR/Cas9, и освещаются проблемы и перспективы на будущее.

Ключевые слова: соя (*Glycine max* L), засуха, CRISPR/Cas9

Abstract. Soybean (*Glycine max* L) is one of the important plants in agriculture and food industry, and its grain is one of the main sources of protein and fat necessary for human health. Climate change and drought have a negative impact on the development and yield of soybean, among many other plants. With the help of modern genome editing methods, it is possible to create soybean varieties that develop normally and maintain their yield even in drought conditions. In particular, the CRISPR/Cas9 method of genome editing is currently widely used in various studies due to its ease, convenience and low cost. This article analyzes the research conducted on increasing the drought tolerance of soybean plants using CRISPR/Cas9 technology and highlights the problems and future prospects.

Key words: Soybean (*Glycine max* L), drought, CRISPR/Cas9

Kirish. So'ya (*Glycine max* L) oziq-ovqat sanoati va chorchachilikda muhim o'rin tutgan dukkakli o'simliklardan biridir [1]. So'ya asosan tropik, subtropik va mo'tadil iqlim mintaqalarda yetishtiriladi (FAO). So'ya o'simligining doni o'zida ko'p miqdorda yog' va oqsil moddalarini saqlashi bilan boshqa o'simlik mahsulotlaridan ajralib turadi [2]. Dunyo miqyosida 2023-yili so'ya o'simligi 137.5 mln gektar maydonda ekilib, 370.8 mln tonna hosil olingan [3]. Yetilgan quruq soya donining tarkibi taqriban 35-40% oqsil, 20% lipid, 9% kletchatka va 8.5% suvdan tashkil topgan [4]. Ushbu o'simlik turli ekologik muhitlarda o'sishi mumkin, lekin abiotik stresslar asosan qurg'oqchilikka ta'sirchan [5]. Soya suvni ko'p talab qiladigan ekin bo'lib, o'sishi va hosil berishi uchun ko'p miqdorda suv sarflanadi [6].

Qurg'oqchilik katta hududlarga ta'sir qilishi mumkin bo'lgan yirik tabiiy ofatdir. Kuchli qurg'oqchilik iqtisodiyotga, ekologik va albatta, qishloq xo'jaligiga jiddiy ta'sir ko'rsatadi [7]. Qurg'oqchilik butun dunyo bo'ylab o'simliklarning o'sishi va rivojlanishiga ta'sir qiluvchi eng og'ir ekologik stresslardan biridir, bu esa o'z navbatida ekinlar hosildorligi va unumdorligini pasayishiga sabab bo'ladi [8]. FAO malumotlariga ko'ra, 2019-yilda dunyo bo'ylab ekin va chorvachilikdan olinadigan hosilning taxminan 34% ga pasayishi qurg'oqchilik va uning ikkilamchi ta'sirlari natijasidir [9]. Qurg'oqchilik global so'ya hosiliga sezilarli, o'zgaruvchan yo'qotishlarga olib keladi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, qurg'oqchilik o'rtacha yillarda hosildorlikni kamayishi o'rtacha 20% dan ortishi mumkin. Soya hosildorligi quruq davrlarda yoki qurg'oqchilik paytida 50% dan ortiqqa pasayishi mumkin, bu esa yetishtiruvchilar va fermerlar uchun katta moliyaviy yo'qotishlarga olib keladi [10]. Braziliya kabi yirik soya yetishtiruvchi mamlakatlarning ba'zi mintaqalarida qurg'oqchilik paytida 74% gacha yo'qotishlarga duch kelgan holatlar ham qayt etilgan [11].

Global iqlim o‘zgarishi va suv tanqisligi muammolari ortayotgan bugungi kunda qurg‘oqchilikka chidamli o‘simlik navlarini yaratish dolzarb vazifalardan biri hisoblanadi. Bunday hususiyatli o‘simlik navlari an‘anaviy seleksiya va zamonaviy genetik muhandislik usullari yordamida olish imkoni mavjud. An‘anaviy seleksiya usullaridan foydalangan holda, qurg‘oqchilikka chidamlilik xususiyatlariga ega bo‘lgan va oldindan tanlab olingan soya genofondlari (donor navlar) o‘zaro chatishtirilib, olingan avlodlarga ijobiy allellarni kiritish mumkin. Biroq, barqaror belgilarga ega bo‘lgan va keyinchalik yetishtirishga yaroqli liniyalarni tanlab olish uchun keyingi avlodlarni keng ko‘lamli skriningdan (sinovdan) o‘tkazish talab etiladi [12]. Shuningdek, genetik transformatsiya yordamida turli organism genlarini doimiy yoki tashqi ta‘sir orqali faollanadigan promotorlarga biriktirib ekspressiyalash orqali ham bunday hususiyatli soya navlari olish mumkin. Soya o‘simligiga *Arabidopsis thaliana* *AtMYB44* geni transformatsiya qilinganda, suv yetishmaydigan hududlarda ushbu o‘simlikning rivojlanishi va hosili yaxshilangani aniqlangan [13]. Genlarni yuqori aniqlikda va tez tahrirlash imkonini bergan genom tahrirlashning yangi usuli CRISPR/Cas9 yordami bilan soya o‘simligi qurg‘oqchilikka chidamliligini oshirish tajribalari bajarilmoqda. CRISPR/Cas9 texnologiyasi 'knock-out' (gen funksiyasini susaytirish) yondashuvlari orqali soyaning qurg‘oqchilikka javob beruvchi genlarini tavsiflashda muvaffaqiyatli qo‘llanilmoqda. Xususan, soyaning kunlik ritm genlarini (*GmLCLs*) CRISPR/Cas9 yordamida mutatsiyaga uchratish natijasida suvsizlanish stressi sharoitida suv yo‘qotishi kamaygan mutant o‘simliklar olindi [14]. Quydagi bo‘limlarda biz genom tahrirlash yondashuvlar orqali qurg‘oqchilikka chidamliligi oshirilgan soyaning xususiyatlari haqidagi misollarni ko‘rib chiqamiz.

So‘yaning qurg‘oqchilikka javob berish mexanizmlari. O‘simliklar suv tanqisligining salbiy ta‘sirini yengish uchun turli xil mexanizmlardan foydalanadi. O‘simliklar turli mexanizmlar yordamida qurg‘oqchilikning salbiy ta‘sirini yengishga harakat qiladi, bu "qurg‘oqchilikka chidamlilik" deb ataladi [15]. Fotosintez jarayonining susayishi bilan barg og‘izchalarining torayishi o‘simliklarda kuzatiladigan tipik qurg‘oqchilik reaksiyasi hisoblanadi [16]. Qurg‘oqchilik sharoitiga moslashish jarayonida absiz kislotasi (ABA) muhim o‘rin tutib, ildizdan-barggacha bo‘lgan jarayonlarni (stomalarning yopilishi, stressga chidamlilik genlarni faollashtirish, o‘simlik umumiy o‘sishni muofiqlashtirish) boshqarib turadi [17]. Qurg‘oqchilikka chidamli soya navlari chidamsizlariga nisbatan ABA miqdori yuqori bo‘lishi kuzatilgan [18].

Qurg‘oqchil sharoitda o‘simliklarda hujayra turgorini meyorida saqlash qobiliyati ham moslanish xususiyatlaridan biridir. Suv tanqisligida o‘simliklar hujayrasi osmoprotektantlar deb ataladigan metabolitlar sintezini kuchaytirish orqali hujayradagi osmotik muvozanatni saqlaydi [19]. Osmoprotektantlarga suvda eruvchi moddalar: shakar, organik kislotalar va erkin aminokislotalar kiradi. Ushbu moddalar hujayra tashqarisi va ichkarisidagi suyuqlik osmotik farqinihamda hujayra membranasini butunligini saqlashda muhim ro‘l o‘ynaydi [20]. Soyaning

gullash davrida prolin aminokislotasining ortishi ham qurg‘oqchilikka moslanish mexanizmlaridan biri ekanligi aniqlangan. Prolin o‘simlik hujayra ichki osmotik potensialini o‘zgartirishi orqali suv so‘rilishini yaxshilashi kuzatilgan [21].

Genom tahrirlash texnologiyalari: Soyadagi qo‘llanilishi. Genetik mexandislik usullarini qishloq xo‘jaligidagi muhim ahamiyatli o‘simliklar xususiyatlarini qisqa muddat ichida yaxshilash imkonini berdi [22]. Gullash vaqti, kasalliklarga chidamlilik va lipid miqdori kabi xususiyatlarni boshqaruvchi genlar aniqlangan va soyani yaxshilash uchun nishon sifatida ishlatilmoqda [22–24]. Genlar funksiyasini kuchaytirish va susaytirish yondashuvlari, xususan RNAi va CRISPR/Cas9 texnologiyalari, soya o‘simligida genlarning o‘simliklar fiziologiyasiga ta‘sirini o‘rganishda qimmatli ma‘lumotlarni beradi. CRISPR/Cas9 texnologiyasi yordamida qurg‘oqchilikka chidamli soya navlarini yaratishda asosiy etibor o‘simlikdagi ildiz tizimi, qurg‘oqchilik stressi va osmos jarayonlarini boshqarishda salbiy ta‘sir ko‘rsatuvchi genlar yoki transkripsiya omillarini maqsadli tahrirlashga asoslangan. HD-Zip transkripsiya faktorlari o‘simliklarda rivojlanish, ikkilamchi metabolizmlar va obiotik stresslarga javob beruvchi funksiyani bajaradi. Soyada ushbu transkripsiya faktorlariga mansub HD-Zip I ni kodlovchi *GmHdz4* geni CRISPR/Cas9 yordamida o‘chirilganda, mutant o‘simliklarning ildiz yuzasi va ildiz uchlari soni nazoratlariga nisbat sezilarni ortgani, natijada turgor bosimi yaxshilanib qurg‘oqchilikka chidamliligi ortgan [25].

Qurg‘oqchilikka chidamlilikni oshirish uchun maqsadli genlar. Qurg‘oqchilikka chidamlilik - bu bir nechta genlar va atrof-muhit omillari ta‘sirida yuzaga keladigan poligen xususiyat bo‘lib, uni bitta xususiyat asosida baholashni qiyinlashtiradi. Park va uning jamoasi QTL xaritalash va gen ekspressiyasi tahlillari asosida qurg‘oqchilikka aloqdor bo‘lgan beshta nomzod genlarni aniqlashdi, bular orasidan ikkitasi “*Glyma.06G076100* va *Glyma.10G029600*” funksional tahlil uchun taklif qilindi [26]. Qurg‘oqchilik sharoitida hujayrada genlar ekspressiyasi sezilarli darajada o‘zgarishi yuqori sifatli sekvens texnologiyalari yordamida aniqlandi [27]. Qiyosiy transkriptom tahlillar natijasida qurg‘oqchilikka aloqador qator genlar va gen oilalari aniqlandi. Hussain jamoasi tajribalarida soyada qurg‘oqchilikka javobgar *GmNAC* genlarining 28 ta genlar aniqlangan bo‘lib, bu genlar orasidan faqat 8 tasi qurg‘oqchilikka chidamli navlarida yuqori ekspressiyani ko‘rsatgan [28]. WRKY transcription faktorlari ham o‘simliklarda abiotik stressga javobgarligi o‘rganilgan. So‘yada *GmWRKY12* gen ekspressiyasini oshirilganda, qurg‘oqchilik stressida hujyalarda prolin sintezi oshganligi kuzatilgan [29]. MikroRNKlar ham qurg‘oqchilikka chidamlilikda ishtirok etuvchi genlarni boshqarishda ishtirok etishi aniqlangan. Xususan, qurg‘oqchilik vaqtida soya o‘simligida miR164 miqdori kamayishi, *GmNAC35* geni ekspressiyasining oshishiga sabab bo‘lib, qurg‘oqchilik stressini yengishda yordam berishi aniqlangan [30].

Genom tahrirlash texnologiyalarini soya o‘simligiga joriy etishdagi muammolar. Genom tahrirlash texnologiyalari, xususan CRISPR/Cas9 juda aniq bo‘lsa-da, soya

o'simligining o'ziga xos biologiyasi ba'zi qiyinchiliklarni tug'diradi. Soya hujayralari differentsiatsiyalangan to'qimadan yangi o'simlik organlarini (ildiz va poya) hosil qilishga sust javob beradi. Ko'pincha somatik embriogeneza ba'zi genotiplardagina yuqori samaradorlik ko'rsatadi, aksariyat tijoriy navlar esa regeneratsiya kuzatilmaydi. Shuningdek, soya kalluslarini olish, ularni tahrirlash, tanlab olish (seleksiya) va qayta o'simlikka aylantirish jarayoni bir necha oydan 1-2 yilgacha davom etishi mumkin [31]. Ko'pincha geni tahrirlangan bitta hujayradan emas, balki bir guruh hujayralardan o'simlik o'sib chiqqanda, o'simlik ximer (tahrirlangan va tahrirlanmagan hujayralar aralashmasi) bo'lib qoladi. Bu esa to'liq gen tahrirlangan o'simlikni olish uchun keyingi avlod o'simliklarini yetishtirish va saralash ishlarini talab qiladi.

CRISPR/Cas9 tizimidan foydalanishda eng dolzarb texnik muammolardan biri bu off-target effektidir. Bu hodisa Cas9 nukleazasi tomonidan yo'naltiruvchi RNK (gRNA) ketma-ketligiga o'xshash, ammo nishon hisoblanmagan boshqa genom qismlarining tasodifiy kesilishi natijasida yuzaga keladi. Ushbu muammoni oldini olish uchun CRISPR-P v2.0 yoki Cas-OFFinder kabi dasturlar yordamida gRNA dizayn qilinayotganda, butun genom bo'ylab mumkin bo'lgan off-target saytlari yetarlicha chuqur tahlil qilish va eng optimal gRNKlarni tanlash talab qilinadi [32].

Xulosa va kelajakdagi istiqbollar. So'nggi yillarda olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, CRISPR/Cas9 texnologiyasi soyaning qurg'oqchilikka chidamliligini oshirishda yetakchi vositalardan biriga aylandi. An'anaviy seleksiyadan farqli o'laroq, ushbu metod murakkab gen tarmoqlarini maqsadli va aniq tahrirlash imkonini beradi. Shuningdek, bu texnologiya yordamida genomida transgen element saqlamaydigan o'simlik navlarini olish imkoni mavjud. Bunday o'simliklar GMO hisoblanmaydi va ularni amaliy dehqonchilikka joriy etish va xalqaro bozorda sotish jarayonini sezilarli darajada osonlashtiradi.

Qurg'oqchilik — poligen xususiyatdir. Shuning uchun kelgusida bitta genni emas, balki bir vaqtning o'zida bir nechta yo'llarni (masalan, transpiratsiya, osmoregulyatsiya va ildiz o'sishi) nazorat qiluvchi genlar blokini tahrirlash samaraliroq bo'ladi.

Foydalanilgan adabiyotlar.

1. Boerema A, Peeters A, Swolfs S, Vandevenne F, Jacobs S, Staes J, et al. Soybean Trade: Balancing Environmental and Socio-Economic Impacts of an Intercontinental Market. Zia A, editor. PLOS ONE. 2016;11: e0155222. doi:10.1371/journal.pone.0155222
2. Pagano MC, Miransari M. The importance of soybean production worldwide. Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production. Elsevier; 2016. pp. 1–26. doi:10.1016/B978-0-12-801536-0.00001-3
3. FAOSTAT. [cited 7 May 2026]. Available: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

4. Qin P, Wang T, Luo Y. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. *J Agric Food Res.* 2022;7: 100265. doi:10.1016/j.jafr.2021.100265
5. Hasanuzzaman M, Nahar K, Rahman A, Mahmud JA, Hossain MS, Fujita M. Soybean Production and Environmental Stresses. *Environmental Stresses in Soybean Production.* Elsevier; 2016. pp. 61–102. doi:10.1016/B978-0-12-801535-3.00004-8
6. Bhardwaj SF. Consumptive Use and Water Requirement of Soybeans. *J Irrig Drain Eng.* 1986;112: 157–163. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:2(157)
7. Beguería S, Vicente-Serrano SM, Angulo-Martínez M. A Multiscalar Global Drought Dataset: The SPEIbase: A New Gridded Product for the Analysis of Drought Variability and Impacts. *Bull Am Meteorol Soc.* 2010;91: 1351–1356. doi:10.1175/2010BAMS2988.1
8. Miao Z, Han Z, Zhang T, Chen S, Ma C. A systems approach to a spatio-temporal understanding of the drought stress response in maize. *Sci Rep.* 2017;7: 6590. doi:10.1038/s41598-017-06929-y
9. Damages and losses. In: www.fao.org [Internet]. [cited 7 May 2026]. doi:10.4060/cb3673en
10. Wei Y, Jin J, Jiang S, Ning S, Liu L. Quantitative Response of Soybean Development and Yield to Drought Stress during Different Growth Stages in the Huaibei Plain, China. *Agronomy.* 2018;8: 97. doi:10.3390/agronomy8070097
11. Ferreira RC, Sibaldelli RNR, Crusiol LGT, Neumaier N, Farias JRB. Soybean Yield Losses Related to Drought Events in Brazil: Spatial–Temporal Trends over Five Decades and Management Strategies. *Agriculture.* 2024;14: 2144. doi:10.3390/agriculture14122144
12. Carter TE, Todd SM, Gillen AM. Registration of ‘USDA-N8002’ Soybean Cultivar with High Yield and Abiotic Stress Resistance Traits. *J Plant Regist.* 2016;10: 238–245. doi:10.3198/jpr2015.09.0057crc
13. Seo JS, Sohn HB, Noh K, Jung C, An JH, Donovan CM, et al. Expression of the Arabidopsis AtMYB44 gene confers drought/salt-stress tolerance in transgenic soybean. *Mol Breed.* 2012;29: 601–608. doi:10.1007/s11032-011-9576-8
14. Yuan L, Xie GZ, Zhang S, Li B, Wang X, Li Y, et al. GMLCLs negatively regulate ABA perception and signalling genes in soybean leaf dehydration response. *Plant Cell Environ.* 2021;44: 412–424. doi:10.1111/pce.13931
15. Basu S, Ramegowda V, Kumar A, Pereira A. Plant adaptation to drought stress. *F1000Research.* 2016;5: 1554. doi:10.12688/f1000research.7678.1
16. Liu F, Jensen CR, Andersen MN. Hydraulic and chemical signals in the control of leaf expansion and stomatal conductance in soybean exposed to drought stress. *Funct Plant Biol.* 2003;30: 65. doi:10.1071/FP02170

17. Wilkinson S, Davies WJ. ABA-based chemical signalling: the co-ordination of responses to stress in plants. *Plant Cell Environ.* 2002;25: 195–210. doi:10.1046/j.0016-8025.2001.00824.x
18. Mutava RN, Prince SJK, Syed NH, Song L, Valliyodan B, Chen W, et al. Understanding abiotic stress tolerance mechanisms in soybean: A comparative evaluation of soybean response to drought and flooding stress. *Plant Physiol Biochem.* 2015;86: 109–120. doi:10.1016/j.plaphy.2014.11.010
19. Silvente S, Sobolev AP, Lara M. Metabolite Adjustments in Drought Tolerant and Sensitive Soybean Genotypes in Response to Water Stress. Yang H, editor. *PLoS ONE.* 2012;7: e38554. doi:10.1371/journal.pone.0038554
20. Yancey PH. Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses. *J Exp Biol.* 2005;208: 2819–2830. doi:10.1242/jeb.01730
21. Heerden Van PDR, Krüger HJG. Separately and simultaneously induced dark chilling and drought stress effects on photosynthesis, proline accumulation and antioxidant metabolism in soybean. *J Plant Physiol.* 2002;159: 1077–1086. doi:10.1078/0176-1617-00745
22. Arya H, Singh MB, Bhalla PL. Overexpression of *PIF4* affects plant morphology and accelerates reproductive phase transitions in soybean. *Food Energy Secur.* 2021;10: e291. doi:10.1002/fes3.291
23. Haun W, Coffman A, Clasen BM, Demorest ZL, Lowy A, Ray E, et al. Improved soybean oil quality by targeted mutagenesis of the fatty acid desaturase 2 gene family. *Plant Biotechnol J.* 2014;12: 934–940. doi:10.1111/pbi.12201
24. Ngaki MN, Sahoo DK, Wang B, Bhattacharyya MK. Overexpression of a plasma membrane protein generated broad-spectrum immunity in soybean. *Plant Biotechnol J.* 2021;19: 502–516. doi:10.1111/pbi.13479
25. Zhong X, Hong W, Shu Y, Li J, Liu L, Chen X, et al. CRISPR/Cas9 mediated gene-editing of *GmHdz4* transcription factor enhances drought tolerance in soybean (*Glycine max* [L.] Merr.). *Front Plant Sci.* 2022;13: 988505. doi:10.3389/fpls.2022.988505
26. Park G-R, Bae S-H, Kang B-K, Seo J-H, Oh J-H. Identification of candidate genes for drought tolerance in soybean through QTL mapping and gene expression analysis. *Front Genet.* 2025;16: 1564160. doi:10.3389/fgene.2025.1564160
27. Wong CE, Singh MB, Bhalla PL. The Dynamics of Soybean Leaf and Shoot Apical Meristem Transcriptome Undergoing Floral Initiation Process. Sun M, editor. *PLoS ONE.* 2013;8: e65319. doi:10.1371/journal.pone.0065319
28. Hussain RM, Ali M, Feng X, Li X. The essence of NAC gene family to the cultivation of drought-resistant soybean (*Glycine max* L. Merr.) cultivars. *BMC Plant Biol.* 2017;17: 55. doi:10.1186/s12870-017-1001-y

29. Wei W, Liang D, Bian X, Shen M, Xiao J, Zhang W, et al. GmWRKY54 improves drought tolerance through activating genes in abscisic acid and Ca^{2+} signaling pathways in transgenic soybean. *Plant J.* 2019;100: 384–398. doi:10.1111/tpj.14449
30. Hu W, Zhang M, Lu J, Zhang M, He R, Zhu Y, et al. Negative Regulation of GmNAC35 by miR164 Enhances Drought Tolerance in Soybean. *Agronomy.* 2025;15: 1450. doi:10.3390/agronomy15061450
31. Xu H, Guo Y, Qiu L, Ran Y. Progress in Soybean Genetic Transformation Over the Last Decade. *Front Plant Sci.* 2022;13: 900318. doi:10.3389/fpls.2022.900318
32. Lei Y, Lu L, Liu H-Y, Li S, Xing F, Chen L-L. CRISPR-P: A Web Tool for Synthetic Single-Guide RNA Design of CRISPR-System in Plants. *Mol Plant.* 2014;7: 1494–1496. doi:10.1093/mp/ssu044