О МЕХАНИЗМАХ СОЛЕУСТОЙЧИВОСТИ ИНЕКОТОРЫХ ГЕНАХ ТРАНСПОРТЕРОВ И ИОННЫХ КАНАЛОВ ХЛОПЧАТНИКА

Имамходжаева[1] А.С., Салахутдинов[1] И.Б., Камбурова[1] В.С., Усманов[1] Д.Э., Рахматова[1] Н.Р., Раджабов[1] Ф., Мамаджанов[2] А.

[1] Центр геномики и биоинформатики АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан, [2] Институт Биофизики и биохимии при НУУз г. Ташкент, Узбекистан

https://doi.org/10.5281/zenodo.15543450

Аннотация. *Солевой стресс является одним из ключевых факторов, ограничивающих рост и продуктивность хлопчатника (*Gossypium hirsutum*). Изучение молекулярно-генетических основ солеустойчивости растений приобрело особую актуальность в связи с необходимостью устойчивого сельского хозяйства на засоленных почвах. В данной работе обобщены литературные данные о роли кальций-зависимых сигнальных каскадов в адаптации хлопчатника к солевому стрессу, с особым вниманием к семействам генов* ***CIPK (CIPK1, CIPK8) и CBL (CBL10).*** *Рассмотрены механизмы участия CBL–CIPK-модулей в ионном гомеостазе, регуляции Na^+/H^+-антипортеров, Отмечена необходимость дальнейших функциональных исследований этих сигнальных элементов в хлопчатнике с целью углубленного понимания механизмов устойчивости к абиотическим стрессам. Полученные данные могут служить теоретической основой для будущих прикладных разработок.*

Ключевые слова: *хлопчатник (G. hirsutum), механизм устойчивости, солевой стресс, кальций-зависимая сигнализация, CBL–CIPK каскад***.**

Annotatsiya*. Tuz stressi g'o'zaning (Gossypium hirsutum) o'sishi va unumdorligini cheklovchi asosiy omillardan biridir. O'simliklarning tuzlarga chidamliligining molekulyar genetik asoslarini o'rganish sho'rlangan tuproqlarda barqaror qishloq xo'jaligi zarurati bilan bog'liq holda ayniqsa dolzarb bo'lib qoldi. Ushbu maqolada CIPK (CIPK1, CIPK8) va CBL (CBL10) gen oilalariga alohida e'tibor qaratgan holda, tuz stressiga paxta moslashuvida kaltsiyga bog'liq signal kaskadlarining roli haqidagi adabiyot ma'lumotlari umumlashtiriladi. CBL-CIPK modullarining ion gomeostazasida ishtirok etish mexanizmlari va Na^+/H^+ antiporterlarini tartibga solish ko'rib chiqiladi. Abiotik stressga chidamlilik mexanizmlarini chuqurroq bilish uchun g'o'zadagi bu signal elementlarini keyingi funksional o'rganish zarurligi qayd etilgan. Olingan ma'lumotlar kelajakdagi amaliy ishlanmalar uchun nazariy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.*

Kalit so'zlar: G'o'za (G. hirsutum), chilidamliik mexanizmi, tuz stressi, kaltsiyga bog'liq signalizatsiya, CBL-CIPK kaskadi.

Abstract. *Salt stress is one of the key factors limiting the growth and productivity of cotton (Gossypium hirsutum). The study of the molecular genetic basis of plant salt tolerance has become especially relevant due to the need for sustainable agriculture on saline soils. This paper summarizes the literature data on the role of calcium-dependent signaling cascades in cotton adaptation to salt stress, with special attention to the CIPK (CIPK1, CIPK8) and CBL (CBL10) gene families. The mechanisms of participation of CBL-CIPK modules in ion homeostasis, regulation of Na^+/H^+ antiporters are considered. The need for further functional studies of these signaling elements in cotton for a deeper understanding of the mechanisms of resistance to*

abiotic stress is noted. The data obtained can serve as a theoretical basis for future applied developments.

***Key words**: cotton (G. hirsutum), resistance mechanism, salt stress, calcium-dependent signaling, CBL–CIPK cascade.*

Засоление почвы является одной из серьезнейших глобальных проблем, влияющих на развитие растений и как следствие этого на производительность сельского хозяйства.

Понимание механизмов солеустойчивости, в частности хлопчатника, имеют решающее значение для повышения урожайности этой культуры на засоленных почвах, процент которых по миру возрастает из года в год. Повышенные концентрации солей в почве отражаются на метаболической активности клеточных ферментов, ухудшают усвоение питательных веществ и приводят к нарушениям питания, и, соответственно, отражаются на объеме и качестве урожая. К решению такой проблемы привлекаются высокопроизводительные и эффективные современные молекулярно-биологические технологии. У растений существуют различные защитные механизмы, помогающие противостоять вынужденным стрессовым условиям окружающей среды. В таких случаях в организме активизируется внутренний, а именно, геномный потенциал. Одним из важнейших является семейство генов SOS (Salt Overly Sensitive) - генов, играющих важную роль в определении толерантности растений к почвенным солям.

Раскрытие механизмов солеустойчивости растений — это важная область исследований, особенно актуальная в условиях изменения климата и повышения засоления почв. Понимание роли отдельных генов пути SOS, к примеру, CIPK1, CIPK8 и CBL10 в солеустойчивости растений открывает возможности для создания устойчивых к засолению сельхозкультур посредством применения этих генов в генной инженерии и биотехнологии.

В мировой практике имеются примеры разнообразных подходов к повышению солеустойчивости хлопчатника с использованием биотехнологческих техник, к примеру использование генов из различных источников. Например введение генов ThST5, ThST7 и ThST103 из генома *Thellungiella halophila* в геном хлопчатника, что привело к улучшению солеустойчивости растений через устойчивость при прорастания семян, улучшение антиоксидантной системы и ионного гомеостаза, что способствовало повышенной устойчивости к соли и повышенной урожайности [1,2]. Одним из примеров использования именно генов хлопчатника для хлопчатника является работа китайских ученых по сверхэкспрессии гена GaJAZ1 из *G.arboreum* в геноме *G. hirsutum*, в результате чего получено улучшение роста и урожайности в засоленных почвах [3].

Однако с точки зрения процессов, происходящих в растении при абиотических стрессах, с которыми организмы сталкиваются на протяжении вегетационного периода, определенный интерес представляют именно защитные механизмы, сам потенциал растения. С этой точки зрения имеет место интерес к генам группы CBL и CIPK, так как известно, что комплекс CBL1/9–CIPK1 участвует в регуляции ответов на засуху и солевой стресс через взаимодействие с ABA-рецепторами PYLs [4]. В результате проведения геномного анализа семейства генов CBL и CIPK у хлопчатника были выявивлены их консервативные структуры и разнообразные взаимодействия [5]. Оказалось, что, такие гены, как GhCIPK6D1 и GhCIPK8D2, показали повышенную экспрессию при засухе, что указывает на их потенциальную роль в устойчивости к абиотическим стрессам. Познакомимся с функциями некоторых генов подлиже.

Ген CIPK1, также известный как CIPK24 или SOS2, является ключевым компонентом пути SOS. Он взаимодействует с кальций-связывающим белком CBL4 (SOS3), образуя комплекс, который активирует Na^+/H^+-эксхансер SOS1 на мембране, способствуя выведению Na^+ из клеток и повышению солеустойчивости растений. Мутации в этих генах приводят к повышенной чувствительности к соли [6].

Ген CIPK8 является ближайшим гомологом CIPK24 и также играет значимую роль в пути SOS, активируя SOS1 (в листьях *Arabidopsis thaliana* L.), способствуя выведению Na^+ и повышению солеустойчивости. Однако его активность зависит от взаимодействия с CBL10, а не с CBL4, что указывает на существование альтернативных путей солеустойчивости.

Ген CBL10, также известный как SCaBP8, является кальций-связывающим белком, который взаимодействует с CIPK8 для активации SOS1. Этот комплекс играет важную роль в выведении Na^+ из клеток и повышении солеустойчивости растений. Мутации в CBL10 приводят к повышенной чувствительности к соли, подтверждая его ключевую роль в солеустойчивости.

С целью продолжения фундаментальных исследований о механизма солеустойчивости хлопчатника, выполняемых в рамках НИР, на полногеномной последовательности хлопчатника были идентифицированы целевые гены и разработаны праймеры и зонды вышеописанных генов для дальнейшего анализа отобранных для постановки эксперимента 26 генотипов (из коллекции гермоплазмы Центра геномики и биоинформатики) с разной устойчивостью и чувствительностью к засолению. Отобранные образцы использованы в модельном эксперименте по изучению солеустойчивости.

В заключении можно прийти к выводу, что механизмов солеустойчивости в модельном растении (Arabidopsis thaliana) эти гены хорошо изучены, тогда как исследования, связанные с генами CIPK1, CIPK8 и CBL10 у хлопчатника, находятся на стадии активного развития требуют дальнейшего исследования. Исследования последних лет свидетельствуют о ключевой роли кальций-зависимых сигнальных путей, включая CBL–CIPK модули, в формировании устойчивости растений к солевому стрессу. Гены CIPK1, CIPK8 и CBL10, подробно охарактеризованные на модели *A. thaliana*, демонстрируют перспективность для использования в генетической модификации хлопчатника с целью повышения его толерантности к абиотическим стрессам. Геномные исследования хлопчатника подтверждают наличие гомологов этих генов и активное участие некоторых представителей семейства CIPK в ответах на солевой и водный стресс. В то же время, целенаправленные трансформации хлопчатника с использованием этих генов пока единичны, что открывает широкие возможности для последующих биотехнологических разработок сортов, способных адаптироваться к рпоизрастанию в условиях засоленых почв.

ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Javaid, A., Nazish, T., Ali, M. et al. *Thellungiella halophila* ST103 enhances salt tolerance in *Gossypium hirsutum*. J Cotton Res 5, 13 (2022). https://doi.org/10.1186/s42397-022-00120-z.
2. Ali, M., Nazish, T., Javaid, A. et al. Evaluation of *Thellungiella halophila* ST7 for improving salt tolerance in cotton. J Cotton Res 5, 1 (2022). https://doi.org/10.1186/s42397-021-00108-1

3. Zhao G, Song Y, Wang Q, Yao D, Li D, Qin W, Ge X, Yang Z, Xu W, Su Z, Zhang X, Li F and Wu J. (2020). *Gossypium hirsutum* Salt Tolerance Is Enhanced by Overexpression of G. arboreum JAZ1. Front. Bioeng. Biotechnol. 8:157. doi: 10.3389/fbioe.2020.00157.
4. You Z, Guo S, Li Q, Fang Y, Huang P, Ju C, Wang C. The CBL1/9-CIPK1 calcium sensor negatively regulates drought stress by phosphorylating the PYLs ABA receptor. Nat Commun. 2023 Sep 21;14(1):5886. doi: 10.1038/s41467-023-41657-0. PMID: 37735173; PMCID: PMC10514306.
5. Sun W, Zhang B, Deng J, Chen L, Ullah A, Yang X. Genome-wide analysis of CBL and CIPK family genes in cotton: conserved structures with divergent interactions and expression. Physiol Mol Biol Plants. 2021 Feb;27(2):359-368. doi: 10.1007/s12298-021-00943-1. Epub 2021 Feb 18. PMID: 33707874; PMCID: PMC7907412.
6. Nazish, T., Javaid, A., Ali, M. et al. Thellungiella halophila ST5 improves salt tolerance in cotton. J Cotton Res 5, 7 (2022). https://doi.org/10.1186/s42397-022-00112-z