

ИНДУКЦИЯ ТОКСИЧЕСКИХ И СИГНАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ В КОРНЯХ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ В ОТВЕТ НА Ni²⁺ И КОМПЛЕКСЫ Ni²⁺-ГИСТИДИН

**В. С. Мацкевич, А. Д. Герман, К. И. Арзамазкина, К. И. Губаревич,
В. В. Демидчик**

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Никель (Ni) является одновременно важным питательным веществом и экотоксикантом для растений. В ответ на повышение уровня никеля многие растения синтезируют и экскретируют лиганды-хелаторы, такие как гистидин (Гис), связывающие Ni²⁺. С одной стороны, это приводит к выведению Ni²⁺ из почвенного раствора, с другой – приводит к накоплению редокс-активных комплексов Ni-гистидин вблизи плазматической мембраны. В настоящей работе тестировалась гипотеза, согласно которой формирование комплексов Ni-гистидин вызывает активацию систем редокс- и Ca²⁺-сигнализации, способствуя распознаванию избытка Ni²⁺ в среде. Целью настоящего исследования являлось установление роли взаимодействия Ni²⁺ и Гис в индукции токсических и сигнальных реакций в корне высших растений в условиях никелевого стресса. В опытах с регистрацией прорастания модельных растений *Arabidopsis thaliana* L. Heunh. на среде с никелем было показано, что данный тяжелый металл ингибирует формирование и рост корневой системы начиная с концентрации 10 мкМ, в тестовой системе с заменой среды – с 30 мкМ, в гидропонике – с 3 мкМ. Добавление Гис, в соотношении 2 Гис/1 Ni²⁺, значительно понижало токсичность Ni²⁺. При помощи ЭПР-спектроскопии и спиновой ловушки 5,5-диметил-1-пирролин-N-оксидом (ДМПО) было показано, что 0,01–3 мМ Ni²⁺ не вызывает формирования гидроксильных радикалов в стандартных биологических условиях в присутствии 1 мМ L-аскорбата и 1 мМ H₂O₂. В то же время, введение никеля на фоне Гис вызывало мощный синтез гидроксильных радикалов. Аналогичный эффект был продемонстрирован в тестах с флуоресцентным зондом дигидроэтидиум (ДГЭ). Даже концентрация 3 мМ Ni²⁺ (летальный уровень) не вызывала генерацию АФК в корне. При этом введение Ni²⁺ на фоне Гис активировало продукцию АФК, которая достигала максимума на 30 мин. Добавление антиоксидантов (диметилсульфоксида) снижало накопление АФК под действием Ni²⁺-Гис₂. Люминометрический тест (Ca²⁺/экворин) показал, что добавление 0,01-3 мМ Ni²⁺ к корням арабидопсиса не вызывало изменений [Ca²⁺]_{цит.}, однако его введение на фоне Гис индуцировало значительный Ca²⁺-сигнал. Таким образом, избыток никеля в присутствии Гис распознавался системой Ca²⁺-сигнализации растительной клетки. С использованием комплекса молекулярных и физиологических подходов выявлены гены-мишени Ni²⁺-Гис₂ в клетке, такие как редокс-чувствительный K⁺-канал GORK, глутатион-редуктаза GR1, Ca²⁺-зависимая протеинкиназа СРК6 и др. Также были проведены опыты с сельскохозяйственными видами. Они продемонстрировали высокую чувствительность к никелю корневой системы пшеницы и подсолнечника и низкую чувствительность гороха (данный вид рос до 10 мМ Ni²⁺ в среде). Вероятно, это связано с высокой важностью уреазы (никель-содержащий фермент) для бобовых растений.

Работа была выполнена в рамках задания ГПНИ «Исследование функционального взаимодействия сигнально-регуляторных и антиоксидантных систем при стрессе с целью повышения общей стрессоустойчивости высших растений и создания новых биотехнологий» подпрограммы «Молекулярные и клеточные биотехнологии-2» государственной программы научных исследований «Биотехнологии-2» на 2021–2025 гг.