

УДК 606:504

Асланян К.А.

Студентка 2 курса факультета агрономии и экологии

ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени

И.Т. Трубилина

Россия, Краснодар

**СИНТЕТИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПОБОЧНЫХ
ПРОДУКТОВ: ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСГЕННЫХ ЗЛАКОВ**

Аннотация: В статье рассмотрены возможности применения трансгенных злаков для фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами. Обобщены механизмы транспорта, хелатирования и секвестрации, различия фитоэкстракции и фитостабилизации, а также перспективы замкнутой переработки загрязнённой биомассы и экологические ограничения технологии. Особое внимание уделено кадмию, генетическим конструкциям злаков и безопасности.

Ключевые слова: фиторемедиация; тяжёлые металлы; трансгенные злаки; фитоэкстракция; фитостабилизация; синтетическая биология.

K.A. Aslanyan

Second-year student, Faculty of Agronomy and Ecology

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin

Russia, Krasnodar

***SYNTHETIC BIOLOGY AND PROCESSING OF BY-PRODUCTS:
PHYTOREMEDIATION OF HEAVY METALS USING TRANSGENIC
CEREALS***

Abstract: The article examines the possibilities of using transgenic cereals for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. The mechanisms of transport, chelation and sequestration, differences between phytoextraction and phytostabilization, prospects for closed-loop processing of contaminated biomass, and environmental limitations of the technology are summarized. Particular attention is paid to cadmium, genetic constructs of cereals, and safety.

Keywords: phytoremediation; heavy metals; transgenic cereals; phytoextraction; phytostabilization; synthetic biology.

Загрязнение почвы тяжёлыми металлами остаётся проблемой для сельскохозяйственных территорий, промышленных зон и участков рядом с отходами производства. Кадмий, свинец, хром и другие элементы не разлагаются естественным путём. Они сохраняются в почве, переходят в растения и способны попадать в пищевые цепи. Фиторемедиация использует растения как естественный барьер между загрязнённой почвой и окружающей средой. При фитоэкстракции металл поглощается корнями, перемещается в надземные органы и затем удаляется вместе с растительной массой. Фитостабилизация работает иначе. Металл остаётся в почве или корневой зоне, но его подвижность и биодоступность снижаются. Злаки удобны для такой системы благодаря высокой биомассе, развитой корневой системе и способности быстро расти. Изменение генов, отвечающих за транспорт, хелатирование и секвестрацию металлов, способно повысить накопление элементов или, наоборот, удерживать их в корнях.

В работе проведён анализ опубликованных данных по фиторемедиации, физиологии минерального питания и генетической модификации злаков. Сопоставлялись результаты экспериментов с рисом, ячменём, кукурузой и другими злаковыми культурами, способными

накапливать металлы или ограничивать их перемещение в надземную часть. Концентрацию металлов в почве и растениях определяют атомно-абсорбционной спектрометрией, ICP-MS или ICP-OES. Для оценки эффективности фитоэкстракции рассчитывают коэффициент биоконцентрации и коэффициент транслокации. Для кадмия важны транспортные белки семейств ZIP, NRAMP и HMA. HMA3, например, способен направлять кадмий в вакуоли клеток корня. Такая локализация уменьшает перемещение токсичного элемента в листья. Хелатирование снижает токсичность свободных ионов. В растительных клетках металлы связываются с фитохелатинами, металлотионеинами, органическими кислотами и другими соединениями. Синтетическая биология позволяет менять уровень экспрессии генов, связанных с синтезом этих веществ. Для получения трансгенных растений применяются *Agrobacterium*-mediated transformation, биолистическая трансформация и системы редактирования генома.

Анализ опубликованных данных показывает, что генетическая модификация способна заметно менять распределение тяжёлых металлов внутри растения. Наиболее важным оказывается не простое увеличение поглощения, а изменение маршрута металла после попадания в корень. При усилении работы транспортных систем металл быстрее поступает в корневые клетки. Первый вариант подходит для фитостабилизации, второй – для фитоэкстракции. Кадмий особенно удобен для анализа таких механизмов. Он не является необходимым элементом питания, но может использовать те же транспортные пути, что и цинк. Для фитоэкстракции ценным становится сочетание высокой биомассы и способности накапливать металл. Даже умеренная концентрация элемента в тканях может дать значительное извлечение, если растение формирует большой урожай сухой массы. Именно здесь злаки получают преимущество перед небольшими гипераккумуляторами. Для фитостабилизации эффективнее

другая стратегия. Усиление секвестрации металлов в корнях снижает их поступление в побеги. Вакуолярное депонирование ограничивает контакт токсичного иона с цитоплазматическими мишенями. Корень становится своеобразным барьером. Большое значение имеет почва. Одинаковая концентрация металла в грунте не означает одинаковую доступность для растения. pH, содержание органического вещества, катионообменная ёмкость и влажность меняют подвижность элементов.

Генетическая конструкция также должна соответствовать задаче. Для фитоэкстракции выгодна экспрессия генов, усиливающих поступление и транспорт металлов в надземную часть. Для фитостабилизации предпочтительнее корневая экспрессия генов, отвечающих за связывание и вакуолярное накопление. После выращивания возникает проблема биомассы. В ней концентрируются загрязнители, поэтому обычное сельскохозяйственное использование исключается. Перспективным считается замкнутый цикл, при котором металл извлекается из растительного материала, а остаточная биомасса направляется на контролируемую переработку. Такой подход уменьшает объём отходов и позволяет вернуть часть металлов в промышленный оборот. Есть и биологические ограничения. Трансгенные растения могут отличаться по скорости роста, устойчивости и взаимодействию с почвенной микробиотой. Полевое распространение пыльцы и семян создаёт отдельные экологические риски. Поэтому практическая фиторемедиация требует пространственного контроля и исключения попадания материала в пищевое производство. Практическая ценность технологии зависит не только от генетики растения. Существенны свойства почвы, форма металла, водный режим и дальнейшая судьба загрязнённой биомассы. Наиболее интересной выглядит замкнутая схема: трансгенный злак извлекает металл, биомасса собирается отдельно, после чего металл возвращается в контролируемый промышленный цикл. Такой вариант

связывает селекцию, синтетическую биологию и экологическую переработку в единую технологию очистки загрязнённых территорий.

Использованные источники:

1. Битюцкий Н. П. Микроэлементы высших растений: монография. — 2-е изд. — Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2020. — 368 с.
2. Коротченко И. С., Кириенко Н. Н. Детоксикация тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu) в системе «почва — растение» в лесостепной зоне Красноярского края: монография. — Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2012. — 228 с.
3. Прохорова Н. В., Матвеев Н. М., Павловский В. А. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье: монография. — Самара: Самарский университет, 1998. — 131 с.
4. Рыбчин В. Н. Основы генетической инженерии: учебник для студентов биологических специальностей вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург: Издательство СПбГТУ, 1999. — 521 с.
5. Скапцов М. В., Куцев М. Г. История и методология генной инженерии растений: учебное пособие. — Барнаул: Алтайский государственный университет, 2013. — 180 с.