**Развитие органического земледелия в Туркестанской области: роль PGPR-бактерий в восстановлении засоленных почв**

Джумаханов Б.М.

Центр «Ясауи» Академии сельскохозяйственных наук Республики Казахстан, г. Туркестан

Старший научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук

Email: dbitore@mail.ru

Ултанбекова Г.Д.

Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы

Старший преподаватель, кафедры биотехнологии

Email: ultanbekova77@mail.ru

Фалеев Д.Г.

Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы

Старший преподаватель, кафедры биотехнологии

Email: ex\_eko@mail.ru

Сарсекеева Гульнар Жаткамбаевна

Казахский национальный женский педагогический университет

sarsekeevagulnar7@gmail.com

**Мазмуни:** Илмий ишда Қозоғистоннинг Туркистон вилоятидаги шўрланган тупрокларни тиклаш учун PGPR (ўсимлик ўсишини кўллаб-қувватловчи ризобактериялар) асосида ишлаб чиқилган биоорганик ўғитларнинг таъсири ўрганилди. *Azospirillum brasilense* ва *Bacillus subtilis* штаммларининг микроб консорциумлари пахтанинг ҳосилдорлигини 18% оширди (22.1 ± 1.3 ц/га дан 26.4 ± 1.8 ц/га гача) ва тупрокдаги туз миқдорини 25% камайтирди (8.7 ± 0.5 г/кг дан 6.2 ± 1.4 г/кг гача). Натижалар PGPR-бактерияларнинг фитогормонлар (ИУК) синтези ва агротехник усуллар (беда севообороти) билан биргаликдаги самарадорлигини тасдиқлайди. Тавсия этилади: биоўғитларни сертификациялаш ва Озбекистон билан биргаликдаги лойиҳаларни ривожлантириш.

**Калит сўзлар:** Органик деҳқончилик, PGPR, тупрокнинг шўрланиши, биоўғитлар, фитогормонлар, Қозоғистон.

**Аннотация**. Исследование посвящено разработке биопрепаратов на основе PGPR (ризобактерий, стимулирующих рост растений) для реабилитации засоленных почв Туркестанской области Казахстана. Микробные консорциумы (*Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*) повысили урожайность хлопчатника на 18% (с 22.1 ± 1.3 до 26.4 ± 1.8 ц/га) и снизили засоление почв на 25% (с 8.7 ± 0.5 до 6.2 ± 0.4 г/кг). Установлена корреляция между синтезом фитогормонов (ИУК) и стимуляцией корневой системы. Рекомендовано внедрение сертифицированных биопрепаратов и совместные проекты с Узбекистаном для адаптации технологий в условиях аридного климата.

**Ключевые слова:** Органическое земледелие, PGPR, засоление почв, биопрепараты, фитогормоны, Казахстан.

**Abstract.** This study evaluates the potential of PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) consortia (*Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*) to restore saline soils in Turkestan Region, Kazakhstan. Field experiments demonstrated an 18% increase in cotton yield (from 22.1 ± 1.3 to 26.4 ± 1.8 t/ha) and a 25% reduction in soil salinity (from 8.7 ± 0.5 to 6.2 ± 0.4 g/kg). The results highlight the role of PGPR in synthesizing phytohormones (IAA) and enhancing root growth. The integration of microbial consortia with crop rotation (alfalfa) proved effective for sustainable agriculture. Recommendations include certification of biofertilizers and collaborative research with Uzbekistan to address regional soil degradation.

**Keywords:** Organic farming, PGPR, soil salinization, biofertilizers, phytohormones, Kazakhstan.

**Введение**

**Актуальность**
Засоление почв в Казахстане охватывает 21.5% мировой площади засоленных земель, что напрямую угрожает продовольственной безопасности региона [1]. В Туркестанской области, где хлопчатник является ключевой сельскохозяйственной культурой, вторичное засоление орошаемых почв достигло критических значений (ECe = 8–10 dS/m) [4]. Традиционные методы мелиорации (химические удобрения, промывка почв) требуют значительных финансовых затрат и усугубляют деградацию экосистем [2]. В этой связи применение PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) — бактерий, синтезирующих фитогормоны и повышающих доступность питательных элементов, — рассматривается как экологически безопасная альтернатива [3]. Исследования подтверждают, что микробные консорциумы на основе *Azospirillum* и *Bacillus* способны снижать стресс у растений в засоленных условиях [5]. Однако 95% рынка биопрепаратов в Казахстане зависит от импорта [6], что подчеркивает необходимость разработки локальных технологий.

**Цель работы.** Оценка эффективности биопрепаратов на основе PGPR-бактерий для восстановления засоленных почв и повышения урожайности хлопчатника в условиях Туркестанской области.

**Задачи исследования.** Выделение и тестирование солеустойчивых штаммов PGPR (*A. brasilense*, *B. subtilis*) из ризосферы хлопчатника. Определение их способности синтезировать фитогормоны (ИУК) в экстремальных условиях (NaCl до 10%, pH 7–9). Проведение полевых экспериментов с обработкой семян биопрепаратом (10⁹ КОЕ/мл). Анализ влияния PGPR на урожайность хлопчатника и снижение засоления почв.

**Методики исследований**

1. *Выделение штаммов PGPR*

Бактерии (*Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*) выделены из ризосферы хлопчатника (корневой зоны растений) методом серийных разведений [7]. Образцы ризосферной почвы (1 г) суспендировали в 9 мл стерильного физиологического раствора (0.85% NaCl).Проводили серийные разведения (10⁻¹–10⁻⁶) и высевали на агаризованную среду King’s B, обогащенную 0.5% глюкозы. Инкубация при 28°C в течение 48 часов. Отбор колоний по морфологическим признакам (форма, цвет, края). Идентификация: ПЦР-анализ генов 16S рРНК для подтверждения видовой принадлежности.

2. *Оценка солеустойчивости*

Тестирование in vitro проводили при вариациях NaCl (0–10%) и pH (7–9) [2]. Бактериальные суспензии (10⁶ КОЕ/мл) инокулировали в жидкую среду LB с добавлением NaCl (0%, 4%, 8%, 10%) и буферных растворов для регулирования pH. Инкубация при 28°C, 150 об/мин, 72 часа. Рост оценивали по оптической плотности (OD600) и подсчету колоний (КОЕ/мл). Критерий устойчивости: Штаммы считались солеустойчивыми при сохранении роста при NaCl ≥ 8% и pH ≥ 8.5.

3. *Анализ синтеза индолил-3-уксусной кислоты (ИУК)*

Количественное определение ИУК выполняли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (HPLC) [5]. Культуры бактерий центрифугировали (10,000 об/мин, 15 мин) для отделения клеток. Супернатант фильтровали (0.22 мкм) и смешивали с реактивом Салковского (1:1) для детекции ИУК. Анализ на HPLC (колонка C18, длина волны 530 нм, подвижная фаза — ацетонитрил/вода, 70:30). Калибровка по стандартным образцам ИУК (Sigma-Aldrich).

4. *Полевой эксперимент*

Обработка семян хлопчатника биопрепаратом проводилась согласно ГОСТ Р 56508-2015 [4]. Схема эксперимента: Участок: Засоленные почвы Туркестанской области (ECe = 8–10 dS/m). Группы: Контроль (без обработки) и опытная (обработка биопрепаратом, 10⁹ КОЕ/мл). 4 повторности на группу, площадь делянки — 10 м². Методика обработки: Семена замачивали в суспензии бактерий на 2 часа перед посевом. Полив капельный, норма — 500 м³/га. Уборка урожая в фазу полной зрелости коробочек.

5. *Статистический анализ*

Данные обработаны с использованием: ANOVA (дисперсионный анализ) для сравнения средних значений между группами. t-критерий Стьюдента для оценки значимости различий (уровень *p < 0.05*). Программное обеспечение: IBM SPSS Statistics 26 и Excel.

*Учет параметров:* Урожайность (ц/га), содержание солей (г/кг), длина корней (см), концентрация ИУК (мкг/мл).

**Результаты исследования**

Проведенные полевые и лабораторные эксперименты подтвердили высокую эффективность применения PGPR-биопрепаратов на основе штаммов *Azospirillum brasilense* и *Bacillus subtilis* для восстановления засоленных почв и стимуляции роста хлопчатника в условиях Туркестанской области. Полученные данные демонстрируют значительное улучшение ключевых агрономических и почвенных показателей, что открывает перспективы для внедрения биотехнологий в сельское хозяйство региона.

*Влияние на урожайность хлопчатника.* Обработка семян PGPR-биопрепаратом привела к статистически значимому увеличению урожайности хлопчатника на 18% — с 22.1 ± 1.3 ц/га в контрольной группе до 26.4 ± 1.8 ц/га (табл. 1). Этот результат связан с усилением роста корневой системы, что обеспечило лучшее усвоение воды и питательных элементов в условиях засоления.

*Динамика засоления почв.* Содержание солей в почве опытных участков снизилось на 25% — с 8.7 ± 0.5 г/кг до 6.2 ± 0.4 г/кг (табл. 1). Данный эффект объясняется комбинированным действием PGPR-бактерий, активирующих микробное сообщество, и севооборота с люцерной, которая способствует естественной мелиорации за счет корневых экссудатов.

*Стимуляция корневой системы и синтез фитогормонов.* Длина корней обработанных растений увеличилась на 31% (с 14.2 ± 1.1 см до 18.6 ± 1.5 см), что коррелирует с повышенным синтезом индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) — ключевого фитогормона роста. Концентрация ИУК в ризосфере опытной группы достигла 15.2 ± 1.1 мкг/мл против 3.1 ± 0.2 мкг/мл в контроле (табл. 1). Это подтверждает роль PGPR в индукции гормонального ответа растений.

*Статистическая достоверность.* Все представленные изменения являются статистически значимыми (*p < 0.05*, t-критерий Стьюдента), что подтверждает воспроизводимость результатов и их практическую ценность для сельского хозяйства.

**Таблица 1. Влияние PGPR-биопрепаратов на агрономические и почвенные показатели**

| **Параметр** | **Контроль (без обработки)** | **PGPR-обработка** |
| --- | --- | --- |
| Урожайность, ц/га | 22.1 ± 1.3 | 26.4 ± 1.8\* |
| Содержание солей, г/кг | 8.7 ± 0.5 | 6.2 ± 0.4\* |
| Длина корней, см | 14.2 ± 1.1 | 18.6 ± 1.5\* |
| Содержание ИУК, мкг/мл | 3.1 ± 0.2 | 15.2 ± 1.1\* |
| \*Примечание: \* — статистическая значимость (p < 0.05). |

Полученные результаты согласуются с мировым опытом применения PGPR в стрессовых условиях [5,7], однако впервые демонстрируют их эффективность для хлопчатника в аридных регионах Центральной Азии. Комбинация биопрепаратов с агротехническими методами (севооборот) может стать основой для устойчивого земледелия в Казахстане и соседних странах, включая Узбекистан, где засоление почв остается критической проблемой.

**Обсуждение.** Результаты согласуются с данными Rembiałkowska (2007), где PGPR увеличивали урожайность на 15–20% в стрессовых условиях [7]. Комбинация биопрепаратов с севооборотом (люцерна) усиливает симбиотическую азотфиксацию, что критично для засоленных почв. Однако внедрение технологии требует: Субсидий для фермеров на закупку биопрепаратов. Сертификации по стандартам IFOAM и ЕС 834/2007 [6, 7].

**Выводы:** PGPR-биопрепараты на основе *A. brasilense* и *B. subtilis* повышают урожайность хлопчатника на 18% и снижают засоление почв на 25%. Севооборот с бобовыми культурами усиливает эффективность биопрепаратов.

**Рекомендации:** Внедрить региональные программы по обучению фермеров использованию PGPR. Разработать нормативную базу для сертификации биоудобрений в соответствии с ГОСТ Р 56508-2015.

**Перспективы совместных исследований с Узбекистаном**

Узбекистан, как и Казахстан, сталкивается с засолением почв в условиях аридного климата. Совместные исследования могут включать: Обмен штаммами PGPR, адаптированными к региональным условиям. Изучение геномного редактирования бактерий для усиления солеустойчивости. Пилотные проекты по внедрению биопрепаратов в Ферганской долине (Узбекистан) и Туркестанской области (Казахстан).

**Список литературы**
1. Mohanty, P. et al. (2021). Soil Biology, 45(3), 112–125.
2. ГОСТ Р 56508-2015. Продукция органического производства.
3. FAO. (2019). Global Soil Salinization Report.
4. Rembiałkowska, E. (2007). Food Chemistry, 102(1), 308–319.
5. EU Regulation 834/2007. Organic production standards.
6. Архипова В.А. и др. (2016). Фундаментальные исследования, 4(2), 346–349.
7. IFOAM. (2016). Global Organic Agriculture Statistics.