

СИМБИОЗ АЗОТФИКСИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ И РАСТЕНИЙ САЛАТА ЛИСТОВОГО (*LACTUCA SATIVA* L.)

И. В. Налетов¹⁾, В. С. Заяц²⁾

¹⁾ ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь
i.naletov@unitsky.com

²⁾ ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь
v.zayats@unitsky.com

Полноценная, функционирующая почва обеспечивает круговорот питательных веществ для оптимального роста растений в сельскохозяйственном производстве. Однако производительность сельского хозяйства часто ограничена доступными питательными веществами почвы, особенно азотом. В данной статье исследуется рост растений салат листового на обеднённом субстрате (песок), проводится гистологический анализ корневой системы. Описаны морфологические особенности обнаруженных клубеньковых образований.

Ключевые слова: салат листовой; симбиоз; азотфиксация; клубеньки.

SYMBIOSIS BETWEEN NITROGEN-FIXING BACTERIA AND LEAF LETTUCE PLANTS (*LACTUCA SATIVA* L.)

I. V. Naletov¹⁾, V. S. Zayats²⁾

¹⁾ *Unitsky String Technologies, Inc. Minsk. Republic of Belarus*
i.naletov@unitsky.com

²⁾ *Unitsky String Technologies, Inc. Minsk. Republic of Belarus*
v.zayats@unitsky.com

A fully functioning soil provides nutrient cycling for optimal plant growth in agricultural production. However, agricultural productivity is often limited by availability of soil nutrients, especially nitrogen. In this paper, the growth of leaf lettuce plants on a depleted substrate (sand) is investigated, and the root system is histologically analyzed. The morphological features of the detected nodule formations are described.

Keywords: leaf lettuce; symbiosis; nitrogen fixation; nodules.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-169-172>

В агроэкосистемах азот является одним из основных питательных веществ, ограничивающих рост растений. Для удовлетворения растущего спроса на азот в сельском хозяйстве во второй половине двадцатого века широко использовались синтетические удобрения, что привело к таким экологическим проблемам, как загрязнение окружающей среды нитратами. Биологическая фиксация азота в растениях является важным механизмом для устойчивого сельскохозяйственного производства и здорового функционирования экосистем. Фиксация азота у бобовых, а также ассоциативная, эндосимбиотическая и эндофитная фиксация азота у небобовых играют важную роль в сокращении использования синтетических азотных удобрений в сельском хозяйстве, повышении содержания питательных веществ в растениях и оздоровлении почв. Поэтому взаимодействия бактерий с эукариотами представляет собой большой общебиологический и агрономический интерес, поскольку данные микроорганизмы часто демонстрируют свойства, повышающие жизнеспособность растений, путём минерализации компонентов почвы для растений, а некоторые из них способны фиксации атмосферного азота [1].

Эволюционно азотфиксирующие бактерии вступают во взаимодействие с корнями растений, стимулируют формирование «наростов» корней – клубеньков. Эффект образования клубеньков широко рассмотрен у растений семейства бобовых (Fabaceae) и семейства Берёзовых (Betulaceae) – у представителей рода Ольхи (*Alnus* sp.) [2].

Так, у растений в момент соприкосновения ризодермы корней с бактериями рода *Rhizobium* sp. через плазмолемму клетки растений происходит проникновение нодуляционный белка Nop L и продуктов Avr-генов, которые в свою очередь вступают в процесс конъюгирования с NB-LRR – продуктом R-генов растения и вызывают комплексный ответ иммунной системы растения. Кроме того, бактерии рода *Rhizobium* sp. способны к образованию клубеньков посредством выделения ризобияльных липополисахаридов, которые в свою очередь стимулируют образование ризобияльных Nod-факторов и молекулярных микробных паттернов (MAMPs). Они в свою очередь связываются с межмембранными белками PRR и RLK (NFP/NFR) – растительные рецепторы подобные киназам. Подобные реакции стимулируют клетки растений вырабатывать неспецифическую иммунную систему растений, связанную с MAMPs белками, что и провоцирует образование клубенька на корневой зоне растения [3]. Различают два основных типа стеблевые и корневые, первые в свою очередь делят на округлые и овальные [3; 4].

Само проникновение бактерий и инфицирование ими корней происходит эволюционно установленным способом, через межклеточное вещество либо через клетки. Оба способа свойственны одним и тем же бактериям и зависит только от растения хозяина (рис 1.).

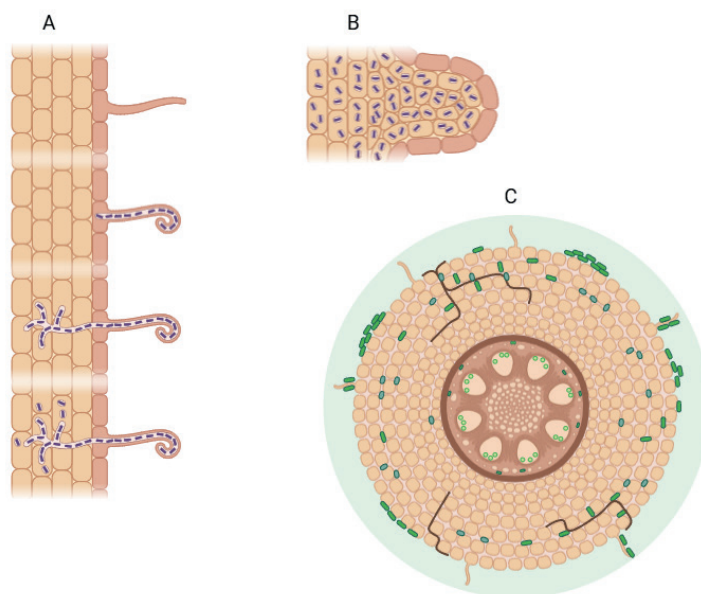


Рис. 1. Разнообразие проникновения и инфицирование корней растений азотфиксирующими бактериями:

a, c – проникновение бактерий через межклеточное пространство начиная с ризойда;
b – проникновение бактерий в корень через клетки эпидермиса и основной паренхимы [3]

В основном азотфиксирующие клубеньковые бактерии встречаются у растений семейства Бобовые/Мотыльковые (Fabaceae), однако клубеньки встречаются и у других растений. Для определения взаимодействия растений с азотфиксирующими бактериями устанавливают наличие гена *gbcL*, который отвечает за симбиотическое взаимодействие.

Нами были зафиксированы азотфиксирующие бактерии в корнях растений салата-латук (*Lactuca sativa* L.) относящегося к семейству Сложноцветные/астровые (Asteraceae) в ходе постановки опыта по влиянию комплексной подкормки для растений uTerra на салат-латук в условиях отсутствия минерального питания на чистом песке. Постановка опыта включала в себя

варианты контроль (песок без добавления подкормки) и варианты роста растений на песке с добавлением различных концентраций uTerra. Комплексная подкормка для растений uTerra по составу представляет собой комплекс гуминовых кислот, вытяжки из биогумуса, а также ассоциации агрономически ценных видов микроорганизмов, включая азотфиксаторов и фосфатсольюбилизаторов.

Так как растения находились в условиях низкого минерального питания, оценивалась не урожайность растений, а способность к адаптации. Так фиксировался пигментный состав листовой пластины, а также морфология корневой системы. Листовая пластина растений с клубеньками обладала высоким содержанием каротиноидов ($226,38 \pm 13,74$ мкг/г сырой массы) по сравнению с растениями контроля ($128,11 \pm 1,98$ мкг/г сырой массы). Содержание хлорофилла a+b составило $4,49 \pm 0,18$ мг/г сырой массы в вариантах с клубеньками, в контроле – $4,01 \pm 0,10$ мг/г сырой массы. Повышение содержания основных пигментов в листьях может говорить об усиленной адаптации растений к стрессовым факторам, в данном случае – дефициту питания.

При аналитическом исследовании растений на стадии пяти настоящих листочков на корнях были обнаружены предварительно классифицированные как каллусные ткани (рис. 2). Растения внешне были здоровы, без бактериальных или грибковых заболеваний.



Рис. 2. Визуальный вид клубеньков на корнях растений салата-латука *Lactuca sativa* L.

В ходе эксперимента были выделены клубеньки у растений салата-латука (*Lactuca sativa* L.), из которых был приготовлен давленый препарат с окрашиванием проводящих тканей. Установлено, что клубеньки действительно содержат азотфиксирующие бактерии, которые поддерживают повышенную активность оксидазы. Наличие этого фермента указывает на активное участие в процессе фиксации азота, что является ключевым аспектом симбиотических связей между растениями и их микробными симбионтами. Окрашивание бактерий в паренхиме также подтвердило наличие симбиоза в клубеньках (рис.3).

Кроме того, в проводящих пучках, которые были исследованы, не обнаружено повреждений, в них и сохранена чёткая направленность ксилемы и флоэмы. Это наблюдение свидетельствует о том, что структура тканей в клубеньках остается целостной и функциональной, что важно для эффективного обмена веществ между растениями и бактериями. Неповрежденные

проводящие ткани обеспечивают надлежащее содержание питательных веществ и воды, что способствует развитию как растений, так и его симбионтов.

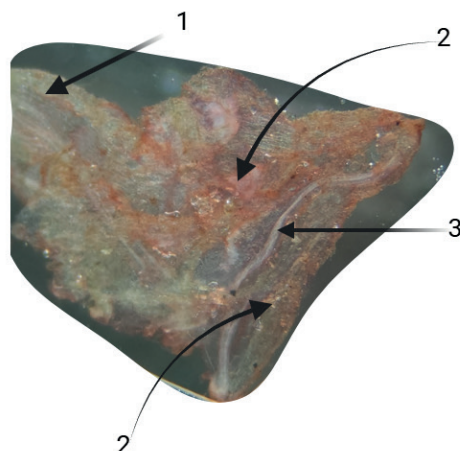


Рис. 3. Ткани клубенька салат-латука *Lactuca sativa* L.

(1 – основной корень, корневой чехлик с зоной деления и роста; 2 – паренхимная ткань с азотфиксирующими бактериями; 3 – сердцевина корня с проводящими тканями)

В дальнейших исследованиях выделенные бактерии из растений будут перенесены на корневую систему салата и сами растения будут помещены в субстрат с оптимальным минеральным питанием, но без азота, который предположительно будет синтезироваться бактериями-симбионтами, содержащимися в клубеньках на корнях.

Результаты проведенного исследования позволят более детально изучать взаимодействие между салатом листовым и азотфиксирующими бактериями, а также оценивать влияние этих симбиотических связей на рост и развитие растений. Полученные данные могут быть полезными для дальнейших исследований эффективности использования симбиотических бактерий в сельском хозяйстве и агрономии, что обеспечивает постоянство урожайности и устойчивости культур.

Библиографические ссылки

1. Проворов Н. А., Воробьев Н. И. Эволюция полезных для растений признаков у азотфиксирующих бактерий: моделирование и конструирование систем межвидового альтруизма (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2015. Т. 51, №. 4. С. 363-363.
2. Оценка разнообразия азотфиксирующих бактерий в ризосфере растений сои методом анализа *nifH* гена / А. К. Кизилова [и др.] // Микробиология. 2012. Т. 81, №. 5. С. 672-672.
3. Проворов Н. А. Растительно-микробные симбиозы как эволюционный континуум // Журнал общей биологии. 2009. Т. 70, №. 1. С. 10-34.
4. Глянько А. К., Ищенко А. А. Иммуитет бобового растения, инфицированного клубеньковыми бактериями *Rhizobium* spp. F. (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2017. Т. 53, №. 2. С. 136-145.
5. Налетов И. В., Заяц В. С., Крюков Е. А. Индукция устойчивости растений *Lactuca sativa* L. к засолению под влиянием грибного экзогенного элиситора // Вестник БГСХА. №3. С.147-150.