

## АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

УДК 579.64

doi: 10.31360/2225-3068-2022-80-140-151

### БИОУДОБРЕНИЕ НА ОСНОВЕ СИЛИКАТНЫХ БАКТЕРИЙ ПОВЫШАЕТ ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОЧВ И КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ *BRASSICA JUNCEA* (L.) CZERN.)

Борисова Г.Г., Воропаева О.В., Малева М.Г., Ширяев Г.И., Лыкова О.В.

Уральский федеральный университет им.  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия, e-mail: maria.maleva@mail.ru

Силикатные ризосферные бактерии, способные разлагать почвенные минералы с высвобождением питательных веществ, являются перспективным ресурсом для создания биоудобрений с целью поддержания плодородия почвы и стимуляции роста растений. В модельных экспериментах была проведена оценка эффективности раздельного и совместного действия биоудобрения, приготовленного на основе силикатных бактерий и торфа в качестве носителя, и азотного удобрения на содержание элементов питания в *Brassica juncea* (L.) Czern (горчица сарептская) и почве, а также морфофизиологические параметры изученного вида. Штамм силикатных бактерий, обладающий ростстимулирующей активностью, был выделен из ризосферной почвы *Tussilago farfara* L. на агаризованной питательной среде Зака и идентифицирован как *Bacillus megaterium*. Растения *B. juncea* выращивали в горшечных культурах в течение 60 суток при естественном освещении. Добавление в почву как био-, так и азотного удобрений, способствовало улучшению параметров роста *B. juncea*. Максимальный положительный эффект наблюдался при их совместном внесении: высота побега увеличивалась в 2,0 раза, биомасса – в 4,0 раза, количество плодов – в 5,6 и семян – в 1,6 раза. При этом также возрастало содержание биогенных элементов в надземной биомассе в расчёте на растение: азота – в 7,0 раз, фосфора и калия – в 2,0 раза. Показано, что биоудобрение на основе силикатных бактерий повышало содержание доступного фосфора в почве, вероятно, за счёт солюбилизации его недоступных форм. В конце эксперимента число колониеобразующих единиц в почвенных образцах с внесённым биоудобрением было в 200 раз выше, чем в контроле, что свидетельствует о жизнеспособности силикатных бактерий. Анализ морфофизиологических характеристик, таких как количество клеток и хлоропластов на единицу площади листа и содержание фотосинтетических пигментов, показал их увеличение (в среднем в 2,0 раза). На основании полученных результатов сделан вывод о целесообразности использования силикатных ризосферных бактерий в комплексе с азотным удобрением.

**Ключевые слова:** силикатные ризосферные бактерии, ростстимулирующая активность, агрохимические показатели, горчица сарептская, биогенные элементы, мезоструктура листа, фотосинтетические пигменты.

Одной из глобальных задач современности является повышение продуктивности культурных растений, в том числе садовых и декоративных культур [12]. Сокращение количества плодородных земель, ухудшение качества почв вследствие антропогенной деятельности делает необходимым поиск экологически безопасных и экономически эффективных подходов к решению данной проблемы [14, 26].

В настоящее время проблема дефицита в почвах доступных для культурных растений элементов питания, как правило, решается внесением химических удобрений. Однако их применение требует немалых финансовых затрат, имеет кратковременный эффект и часто приводит к возникновению экологических рисков [12, 14]. В связи с этим особый интерес представляет использование в растениеводстве биопрепаратов, действие которых основано на растительно-микробных ассоциациях [11, 15].

В последние годы в России и за рубежом большое внимание уделяется изучению ризосферных бактерий, стимулирующих рост растений (PGPR), и оценке перспектив их применения в аграрном секторе [10, 19, 24, 25]. Показано, что для получения биоудобрений могут быть использованы различные виды PGPR, включая силикатные ризобактерии, которые играют эффективную роль в солюбилизации не только нерастворимых форм силикатов, но также калия и фосфатов [21–26]. К настоящему времени накоплены данные, свидетельствующие об улучшении роста и повышении продуктивности культурных растений под влиянием силикатных ризобактерий [13, 17, 20, 22], однако многие аспекты взаимоотношений между этими микроорганизмами и растениями остаются недостаточно изученными. Особый интерес представляет оценка агрохимических параметров субстрата и морфофизиологических изменений растений под влиянием силикатных бактерий не только на организменном, но и клеточном уровне.

**Цель исследования** – оценить эффективность отдельного и совместного действия биоудобрения, приготовленного на основе силикатных бактерий и торфа в качестве носителя, и азотного удобрения на содержание элементов питания в *Brassica juncea* (L.) Czern и почве, а также морфофизиологические параметры модельного растения.

**Объекты и методы исследований.** Эксперименты проводили с использованием горшечных культур.

Штамм силикатных бактерий (СБ) был выделен из ризосферной почвы *Tussilago farfara* L., произрастающей на глинистом грунте гидроотвала, сформированного после золотодобычи вблизи села Быньги (Свердловская область). Посевы были сделаны на агаризованную питательную среду Зака [9]. По морфологическим и физиолого-биохимическим характеристикам СБ были идентифицированы как *Bacillus megaterium* [8]. Они представляют собой аэробные, гетеротрофные микроорганизмы, которые размножаются при достаточной влажности, хорошей аэрации и реакции среды в пределах 5,0–8,0; температурный оптимум – 20–28 °С [9].

Жидкая культура *B. megaterium* была выращена на модифицированной среде Зака, содержащей минеральную форму азота (1,0 г/л) для того, чтобы обеспечить возможность образования спор. Культивирование проводили при постоянной аэрации, температуре  $22 \pm 1$  °С в течение 7 суток до титра  $6 \times 10^8$  клеток/мл. Для приготовления бактериального биоудобрения культура *B. megaterium* была смешана со стерильным торфом и высушена при температуре  $43 \pm 2$  °С.

В качестве модельного вида использовали *Brassica juncea* (L.) Czern, сем. Brassicaceae (горчица сарептская). Это однолетнее травянистое растение активно используется в качестве сидератной, декоративной и кормовой культуры, а семена применяются в медицинских, пищевых и технических целях [5].

Для оценки раздельного и совместного влияния био- и азотного удобрений на агрохимические характеристики и морфофизиологические параметры растений пластиковые горшки объёмом 300 мл заполняли простерилизованным почвенным субстратом, представляющим собой смесь глины с торфом (70 : 30, по объёму). В качестве азотного удобрения использовали аммиачную селитру (АС), 55 мг на 1 горшок. Варианты эксперимента:

- 1) контроль (К) – субстрат без добавления био- и азотного удобрений;
- 2) субстрат с добавлением бактерий (СБ);
- 3) субстрат с добавлением азотного удобрения (АС);
- 4) субстрат с добавлением бактерий и азотного удобрения (СБ + АС).

Семена горчицы высаживали в количестве 15 шт. на горшок. Каждый вариант был представлен в семи повторностях. Растения выращивали в течение 60 суток при естественном освещении (фотопериод – 14 : 10, температура  $24 \pm 2$  °С). Эксперимент повторяли дважды в один и тот же период времени (апрель-май 2018 и 2019 гг.), результаты были усреднены.

В конце вегетации были изучены следующие параметры роста горчицы: высота побега, надземная сырая биомасса, количество плодов и семян.

Общее содержание азота и фосфора в надземной биомассе определяли спектрофотометрически на PD-303UV (APEL) после мокрого озоления растительного материала со смесью концентрированных серной и хлорной кислот (10:1). Содержание азота определяли с помощью реактива Несслера при длине волны 400 нм, а фосфора – с молибдатом аммония в кислой среде при 660 нм [3]. Для определения аммонийного азота и подвижного фосфора в субстрате навески предварительно обрабатывали раствором NaCl (0,05 н) – для извлечения аммонийного азота, либо HCl (1 н) – для извлечения доступного фосфора, затем перемешивали и отфильтровывали [1]. Оптическую плотность экстрактов определяли спектрофотометрически после проведения соответствующих качественных реакций [3]. Содержание общего калия в растительном материале, а также доступного калия в почве измеряли на атомно-абсорбционном спектрометре AAS Vario 6 (Analytic Jena). Определению общего калия предшествовало озоление растительного материала 70%-ной азотной кислотой. Содержание доступного калия определяли после экстрагирования из почвенных образцов с использованием 5%-ного HNO<sub>3</sub>.

Измерение pH субстрата и общее содержание солей (TDS) проводили в водной вытяжке усреднённой навески (1 : 2,5; субстрат : вода дист.) с помощью многофункционального кондуктометра PCE-PHD 1.

Количество жизнеспособных клеток СБ оценивали путём определения количества колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 грамме сухого субстрата. Для этого из почвенных навесок готовили суспензию и дополнительно делали 5 десятикратных разведений. Затем из исходной суспензии и полученных разведений высевали по 100 мкл в чашки Петри со стандартной агаризованной питательной средой Зака, инкубировали в термостате в течение 4–5 суток и подсчитывали выросшие колонии, полагая, что каждая из колоний является результатом размножения одной клетки. Для определения КОЕ использовали чашки Петри, где количество выросших колоний было от 30 до 150. Для пересчёта количества КОЕ на сухой вес определяли влажность почвы.

Определение мезоструктурных характеристик *B. juncea* (толщина листа, мезофилла, объём, количество клеток и хлоропластов) проводили в 30-кратной повторности с помощью программного обеспечения Simagis Mesoplant, согласно [6]. Содержание хлорофиллов *a*, *b* (Хл *a*, Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически при длинах волн 440, 649 и 665 нм в 4 биологических повторностях после экстракции в 80%-ном водном растворе ацетона и рассчитывали, согласно [18].

В таблицах и на рисунке представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки. Для оценки достоверности различий между вариантами использовали непараметрический критерий Манна-Уитни. Разными буквами латинского алфавита обозначены достоверные различия между вариантами при  $p < 0,05$ .

**Результаты и их обсуждение.** Раздельное добавление в почву бактериального и азотного удобрений оказывало положительное влияние на ростовые параметры *B. juncea*. При этом высота побега увеличивалась в среднем в 1,4 раза, а сырая биомасса – в 2 раза по сравнению с контролем (табл. 1). Однако максимальный положительный эффект наблюдался при совместном внесении био- и азотного удобрений: высота побега была выше, чем в контроле в 2 раза, а биомасса – в 4 раза. Ранее была доказана способность выделенного штамма СБ солиubilизировать не только калий, но и фосфаты, а также синтезировать индолил-3-уксусную кислоту – гормон, стимулирующий рост растений [26]. Выводы об улучшении морфологических параметров растений при внесении в почву СБ подтверждаются и другими исследованиями [2, 17].

В результате морфологического анализа генеративных органов растений *B. juncea* (среднее количество плодов на одном побеге и число семян в одном стручке) выявлены достоверные различия между вариантами (табл. 1).

Таблица 1

**Морфометрические параметры *B. juncea*  
через 60 дней вегетации**

Параметр	Варианты опыта			
	К	СБ	АС	СБ + АС
Высота побега, см	75,0 ±4,1a	90,7 ±3,4b	117,0 ±5,1c	155,8 ±5,2d
Сырая биомасса побега, мг	82,1 ±1,1a	126,8 ±2,1b	231,7 ±35,5c	336,1 ±8,4d
Количество плодов, шт.	4,3 ±0,3a	14,0 ±1,2b	10,3 ±0,9c	24,3 ±2,4d
Количество семян, шт./плод	27,7 ±1,2a	37,3 ±2,0b	39,0 ±2,3b	44,7 ±2,1c

Оба удобрения положительно влияли на развитие генеративных органов: среднее количество плодов на растении при раздельном внесении био- и азотного удобрений возросло почти в 3 раза, а количество

семян в стручке – на 37 %. При совместном внесении этих удобрений получены наилучшие результаты: количество плодов было в 5,6, а количество семян – в 1,6 раза выше, чем в контроле.

Важнейшими участниками растительного метаболизма являются такие биогенные элементы как азот, фосфор и калий. Именно эти элементы чаще всего входят в состав классических химических удобрений, так как их недостаток негативно влияет на развитие растений и снижает продуктивность сельскохозяйственных культур [7].

Под влиянием биоудобрения содержание общего азота в надземной биомассе одного растения *V. juncosa* возрастало в 2,2 раза, а под влиянием азотного удобрения – в 4,7 раза относительно контроля (табл. 2). Однако максимальным количеством азота отличались растения при совместном внесении удобрений (в 7,2 раза выше, чем в контроле).

Таблица 2

**Содержание  
биогенных элементов в надземной биомассе *V. juncosa*  
и почве модельных ёмкостей**

Параметр	Варианты опыта			
	К	СБ	АС	СБ + АС
Надземная биомасса <i>V. juncosa</i>				
Содержание общего азота, мг/растение	0,12 ±0,002a	0,27 ±0,02b	0,57 ±0,02c	0,86 ±0,04d
Содержание общего фосфора, мг/растение	0,02 ±0,001a	0,03 ±0,001b	0,03 ±0,002b	0,04 ±0,001c
Содержание общего калия, мг/растение	0,31 ±0,02a	0,48 ±0,03ab	0,52 ±0,03b	0,62 ±0,05c
Почвенный субстрат				
Содержание аммонийного азота, мг/100 г почвы	0,65 ±0,03a	0,62 ±0,01a	0,55 ±0,04b	0,52 ±0,02b
Содержание подвижного фосфора, мг/100 г почвы	3,40 ±0,20a	12,10 ±0,60b	7,10 ±0,50c	16,70 ±1,20d
Содержание обменного калия, мг/100 г почвы	18,80 ±2,1a	14,20 ±1,30b	11,60 ±1,00c	11,70 ±1,50c

Аналогичная тенденция была отмечена и по содержанию общего фосфора и калия в растениях *V. juncea*: под влиянием удобрений оно повышалось и достигало максимальных значений при их совместном внесении (табл. 2). Полученные результаты отчасти объясняются различиями между вариантами по величине надземной биомассы (табл. 1). Кроме того, дополнительное продуцирование бактериями регуляторов роста растений, вероятно, способствовало более активному развитию корней, что и приводило к улучшению поглощения питательных веществ из почвы [10, 26].

По содержанию аммонийного азота в почве различия между вариантами были незначительными (табл. 2). При этом при добавлении аммонийной селитры его количество было достоверно ниже. По-видимому, внесение азотного удобрения благоприятствовало потреблению растениями этого важнейшего элемента и его отчуждению из почвы.

Максимальным количеством доступного фосфора в почве отличались варианты с добавлением биоудобрения. Очевидно, данный факт является отражением высокой микробиологической активности выделенного штамма в отношении соединений фосфора [26].

При внесении как азотного, так и биоудобрения содержание обменного калия в почве было ниже, чем в контроле (табл. 2), что, очевидно, связано с высокой величиной его отчуждения растениями. Однако количество доступного калия оставалось на уровне значений, соответствующих средней обеспеченности. При этом при добавлении биоудобрения оно было на 20 % выше, чем при добавлении азотного удобрения.

Величина рН водной вытяжки почвенных субстратов варьировала незначительно (от 7,0 до 7,3), что соответствует диапазону нейтральных значений. Общее содержание солей в почве (минерализация) за период культивирования растений снижалось почти в 3 раза, вероятно, как результат потребления растениями питательных элементов. Однако в вариантах с добавлением биоудобрения оно было на 30 % выше, что является косвенным подтверждением процессов солубилизации недоступных соединений элементов под влиянием СБ.

По завершении эксперимента число КОЕ в почвенных образцах горшков, в которые биоудобрение не вносилось (варианты К и К + АС), составляло в среднем  $3 \times 10^4$ , а в почвенных пробах с силикатными бактериями (варианты СБ и СБ + АС) – около  $6 \times 10^6$  на 1 г сухого веса. Следовательно, вплоть до завершения эксперимента, ризобактерии сохраняли жизнеспособность и оказывали положительное влияние на характеристики почвы и растений.

Важным показателем эффективности фотосинтетического процесса является структура мезофилла листа. Добавление в почву биоудобрения (как отдельно, так и совместно с аммонийной селитрой) приводило к достоверному увеличению толщины листа *B. juncea* за счёт возрастания толщины мезофилла (табл. 3). Максимальной толщиной листа и мезофилла отличались растения при совместном внесении био- и азотного удобрений.

При раздельном внесении удобрений возрастало число клеток мезофилла (как губчатого, так и палисадного) в расчете на единицу площади листа. При их совместном действии количество клеток было максимальным: в 1,5 раза выше по сравнению с контролем. При этом объём клеток уменьшался (табл. 3). Подобные изменения в структуре мезофилла приводят к увеличению общей поверхности мембран клеток, а, следовательно, внутриклеточной ассимиляционной поверхности, что благоприятствует интенсификации фотосинтеза [6].

При внесении удобрений (как отдельно, так и совместно) достоверно увеличивалось количество хлоропластов в расчёте на единицу площади листа, в то время как объём их существенно не изменялся (табл. 3). Как известно, увеличение объёма пластидного материала у растений также способствует более эффективной реализации фотосинтетической функции.

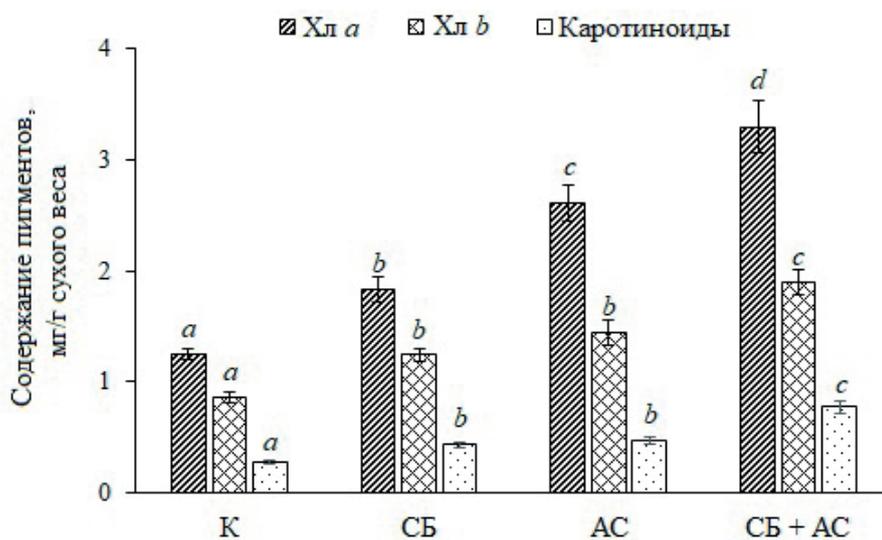
Таблица 3

**Мезоструктурные характеристики  
фотосинтетического аппарата *B. juncea***

Параметр	Варианты опыта			
	К	СБ	АС	СБ + АС
Толщина листа, мкм	184,7 ± 1,9a	194,2 ± 2,4b	185,5 ± 2,0a	198,6 ± 3,1b
Толщина мезофилла, мкм	131,6 ± 1,5a	153,8 ± 1,7b	132,7 ± 1,3a	159,7 ± 1,3c
Число клеток мезофилла, тыс./см <sup>2</sup>	107,4 ± 7,3a	145,6 ± 5,8b	126,6 ± 6,1c	158,8 ± 7,6b
Объём клетки мезофилла, тыс. мкм <sup>3</sup>	45,0 ± 5,8a	15,6 ± 1,4b	19,2 ± 2,4b	30,5 ± 2,8c
Число хлоропластов, млн/см <sup>2</sup>	2,82 ± 0,1a	4,11 ± 0,2b	3,46 ± 0,1c	4,60 ± 0,2d
Объём хлоропласта, мкм <sup>3</sup>	37,9 ± 2,2a	40,7 ± 3,2a	48,4 ± 2,5 b	44,3 ± 2,5a

Интенсивность фотосинтеза и продуктивность растений в значительной степени зависят от состояния пигментного аппарата: Хл *a* является компонентом реакционных центров, в то время как каротиноиды вместе с Хл *b* входят в состав светособирающих комплексов и играют значительную роль в их антиоксидантной защите [16].

Добавление в почву как азотного, так и бактериального удобрения, достоверно (в среднем в 1,8 раза) увеличивало количество Хл *a* в листьях *B. juncea* (рис. 1). При этом положительный эффект от внесения аммиачной селитры был более значимым. Это объясняется активным участием азота в построении нуклеиновых кислот, белков и непосредственно хлорофиллов [4].



**Рис. 1.** Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *B. Juncea*

Отмечено, что как отдельное, так и совместное применение био- и азотного удобрений положительно отражалось на содержании Хл *b* и каротиноидов. Максимальное содержание всех фотосинтетических пигментов было обнаружено при совместном добавлении удобрений: в среднем оно было в 2,6 раза выше по сравнению с контролем. Вероятно, увеличение количества пигментов при внесении удобрений является следствием возрастания числа хлоропластов в клетках *B. juncea*. Кроме того, известно, что калий способствует лучшему использованию железа растением для синтеза хлорофиллов [7], а его содержание было выше при добавлении удобрений.

**Заключение.** Раздельное и совместное внесение в почву биоудобрения на основе силикатных бактерий, а также классического азотного удобрения способствовало увеличению высоты побега, биомассы, количества плодов и семян у модельных растений *Brassica juncea*. При этом возрастало содержание биогенных элементов в расчёте на растение, количество клеток и хлоропластов в расчёте на единицу площади листа и содержание фотосинтетических пигментов. Максимальный положительный эффект наблюдался при совместном внесении био- и азотного удобрений. Показано, что силикатные бактерии повышали содержание доступного фосфора в почве, вероятно, за счёт солиubilизации его недоступных форм. Поэтому применение этих ростстимулирующих ризобактерий в комплексе с азотным удобрением позволит повысить его эффективность, что приведёт к снижению финансовых затрат и антропогенной нагрузки на агроэкосистемы. Способность силикатных бактерий выживать на бедных субстратах и переводить труднодоступные элементы питания в усвояемые для культурных растений формы будет способствовать более эффективному использованию малоплодородных почв.

*Исследования выполнены за счёт гранта  
Российского научного фонда № 21-76-00011,  
<https://rscf.ru/project/21-76-00011>.*

#### Библиографический список

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1970. – 488 с.
2. Белоногова Г.А., Соколова М.Г., Пройдакова О.А. Влияние почвенных бактерий на поведение химических элементов в системе почва-растение // Агрохимия. – 2011. – № 9. – С. 68-76. – ISSN 0002-1881.
3. Биохимия: практикум: учебно-методическое пособие / сост. Г.Г. Борисова, Н.В. Чукина, И.С. Киселева, М.Г. Малева. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2017. – 116 с. – ISBN 978-5-7996-2057-8.
4. Ерошенко Ф.В. Фотосинтетическая деятельность посевов высокорослых и короткостебельных сортов озимой пшеницы в зависимости от уровня азотного питания // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2010. – № 27. – С. 221-224. – ISSN 2073-0853.
5. Машанов В.И., Покровский А.А. Пряноароматические растения. – М.: Агропромиздат, 1991. – 287 с. – ISBN 5-10-000601-3.
6. Мокроносов А.Т., Борзенкова Р.А. Методика количественной оценки структуры и функциональной активности фотосинтезирующих тканей и органов // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – 1978. – Т. 61. – С. 119-133.
7. Мусиенко Н.Н., Тернавский А.И. Корневое питание растений: учебное пособие. – Киев: «Выща школа», 1989. – 203 с. – ISBN 5-11-001414-0.

8. Определитель бактерий Берджи: В 2 т. Пер. с англ. / под ред. Дж. Хоулта и др. – М.: Мир, 1997. – Т. 2. – 368 с. – ISBN 5-03-003112-X.
9. Селибер Г.Л. Большой практикум по микробиологии. – М.: Высшая школа, 1962. – 492 с.
10. Соколова М.Г., Акимова Г.П., Вайшля О.Б. Влияние на растения фитогормонов, синтезируемых ризосферными бактериями // Прикладная биохимия и микробиология. – 2011. – Т. 47. – № 3. – С. 302-307. – ISSN 0555-1099.
11. Шапошников А.И., Белимов А.А., Кравченко Л.В., Виванко Д.М. Взаимодействие ризосферных бактерий с растениями: механизмы образования и факторы эффективности ассоциативных симбиозов (обзор) // Сельскохозяйственная биология. – 2011. – № 3. – С. 16-22. – ISSN 0131-6397.
12. Aggani S.L. Development of bio-fertilizers and its future perspective // Scholars Academic Journal of Pharmacy. – 2013. – Vol. 2(4). – P. 327-332. – ISSN 2320-4206.
13. Anjanadevi I.P., John N.S., John K.S., Jeeva M.L., Misra R.S. Rock inhabiting potassium solubilizing bacteria from Kerala, India: characterization and possibility in chemical K fertilizer substitution // Journal of Basic Microbiology. – 2016. – Vol. 56. – P. 67-77. – <https://doi.org/10.1002/jobm.201500139>.
14. Dubey R.K., NidhiShukla. Organic farming: an eco-friendly technology and its importance and opportunities in the sustainable development // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 3(3). – P. 10726-10734.
15. Glick B.R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications // Scientifica. – 2012. – № 5. – P. 1-15. – <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.
16. Golovko T.K., Gruszecki W.I., Prasad M.N.V., Strzalka K.J. Photosynthetic pigments: Chemical structure, biological function and ecology. – Syktyvkar: Komi Sci. Centre Ural Branch RAS, 2014. – 448 с. – ISBN 978-5-89606-506-7.
17. Han H.S., Supanjani, Lee K.D. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber // Plant, Soil and Environment. – 2006. – Vol. 52(3). – P. 130-136. – <https://doi.org/10.17221/3356-PSE>.
18. Lichtenthaler H. Chlorophylls and carotenoid: pigments of photosynthetic membranes // Methods in Enzymology. – 1987. – Vol. 148. – P. 350-382.
19. Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria // Ann. Rev. Microbiol. – 2009. – Vol. 63. – P. 541-556. – <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>.
20. Maleva M., Borisova G., Koshcheeva O., Sinenko O. Biofertilizer based on silicate solubilizing bacteria improves photosynthetic function of *Brassica juncea* // AGROFOR International Journal. – 2017. – Vol. 2(3). – P. 13-19. – <https://doi.org/10.7251/AGRENG1703013M>.
21. Meena V.S., Maurya B.R., Bahadur I. Potassium solubilization by bacterial strain in waste mica // Bangladesh Journal. – 2015. – Vol. 43. – P. 235-237. – <https://doi.org/10.3329/bjb.v43i2.21680>.
22. Shanware A.S., Kalkar S.A., Trivedi M.M. Potassium solubilisers: occurrence, mechanism and their role as competent biofertilizers. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. – 2014. – Vol. 3(9). – P. 622-629.
23. Sheng X.F., He L.Y. Solubilization of potassium bearing minerals by a wild type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat // Canadian Journal of Microbiology. – 2006. – Vol. 52(1). – P. 66-72. – <https://doi.org/10.1139/w05-117>.
24. Tripti, Kumar A., Usmani Z., Kumar V., Anshumali. Biochar and fly ash inoculated with plant growth promoting rhizobacteria act as potential biofertilizer for luxuriant growth and yield of tomato plant // Journal of Environmental Management. – 2017. – Vol. 190. – P. 20-27. – <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.060>.

25. Vessey J.K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers // Plant and soil. –2003. – Vol. 255(2). – P. 571-586. – <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>.
26. Voropaeva O.V., Maleva M.G., Borisova G.G. Estimation of plant growth promoting activity of silicate solubilizing rhizobacteria for use in agricultural biotechnology // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2390. – P. 030097. – <https://doi.org/10.1063/5.0069228>.

**BIOFERTILIZER BASED  
ON SILICATE BACTERIA INCREASES  
THE PRODUCTIVITY OF SOILS AND CULTIVATED PLANTS  
(ON THE EXAMPLE OF *BRASSICA JUNCEA* (L.) CZERN.)**

**Borisova G.G., Voropaeva O.V., Maleva M.G., Shiryaev G.I., Lykova O.V.**

*Ural Federal University named after  
the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia, e-mail: maria.maleva@mail.ru*

The silicate rhizospheric bacteria capable of decomposing soil minerals with the release of nutrients are a promising resource for creating biofertilizers to maintain soil fertility and stimulate plant growth. The model experiments have evaluated the effect of the separate and combined action of the biofertilizer prepared on the basis of silicate bacteria and peat as a carrier, and the nitrogen fertilizer on the nutrients content in *Brassica juncea* (L.) Czern (brown mustard) and soil, as well as the morphophysiological parameters of the studied species. The strain of silicate bacteria with plant growth promoting activity was isolated from the rhizospheric soil of *Tussilago farfara* L. on Zak's agar nutrient medium and identified as *Bacillus megaterium*. *B. juncea* plants were grown in pot cultures for 60 days under natural light. The addition to the soil of both bio- and nitrogen fertilizers contributed to the improvement of the *B. juncea* growth parameters. The maximum positive effect was observed when they were applied together: the shoot height was increased by 2.0 times, biomass – by 4.0 times, the number of fruits – by 5.6 and seeds – by 1.6 times. At the same time, the content of biogenic elements in the aboveground biomass per plant was also increased: nitrogen by 7.0 times, phosphorus and potassium by 2.0 times. It was shown that the biofertilizer based on silicate bacteria increased the content of available phosphorus in the soil, probably due to the solubilization of its inaccessible forms. At the end of the experiment, the number of colony-forming units in soil samples with the applied biofertilizer was 200 times higher than in the control, which indicates the viability of silicate bacteria. The analysis of morphophysiological characteristics, such as the number of cells and chloroplasts per unit area of the leaf and the content of photosynthetic pigments, showed their increase (2.0 times on average). Based on the results obtained, it was concluded that it is expedient to use silicate rhizospheric bacteria in combination with the nitrogen fertilizer.

**Key words:** silicate rhizospheric bacteria, plant growth promoting activity, agrochemical indicators, brown mustard, biogenic elements, leaf mesostructure, photosynthetic pigments.