



Серия «Биология. Экология»  
2023. Т. 45. С. 46–57  
Онлайн-доступ к журналу:  
<http://izvestiabiobio.isu.ru/ru>

---

---

ИЗВЕСТИЯ  
Иркутского  
государственного  
университета

---

---

Научная статья

УДК 57.044  
<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.45.46>

## Влияние кремнийсодержащих компонентов питательной среды на синтез экзополисахаридов силикатными бактериями

Л. А. Улаханова, С. В. Гомбоева, В. Ж. Цыренов\*

*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия*

*E-mail: [ulahanova@mail.ru](mailto:ulahanova@mail.ru)*

**Аннотация.** Изучено влияние кремнийсодержащих компонентов питательной среды (бентонит, кварцевый песок) на рост выделенных из природных источников Байкальского региона, а также эталонных (*Paenibacillus mucilaginosus*) штаммов силикатных бактерий. В различных опытных вариантах исследованы темпы роста микроорганизмов и синтеза ими широко используемых в промышленности и медицине экзополисахаридов (ЭПС), степень гидролиза ЭПС (содержание редуцирующих сахаров), выполнена оценка удельной продукции ЭПС.

**Ключевые слова:** силикатные бактерии, *Paenibacillus mucilaginosus*, кремнийсодержащие компоненты, экзополисахариды, биосинтез.

---

**Для цитирования:** Улаханова Л. А., Гомбоева С. В., Цыренов В. Ж. Влияние кремнийсодержащих компонентов питательной среды на синтез экзополисахаридов силикатными бактериями // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2023. Т. 45. С. 46–57. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.45.46>

---

Research article

## Effect of Silicon-Containing Components of Nutrient Medium on the Synthesis of Exopolysaccharides by Silicate Bacteria

L. A. Ulakhanova, S. V. Gomboeva, V. Zh. Tsyrenov\*

*East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russian Federation*

**Abstract.** Silicate bacteria have a wide biotechnological potential, they produce a large number of biologically active substances: enzymes that destroy silicates; fungicidal and antimicrobial compounds; phytohormones and exopolysaccharides (EPS). At the same time, they are able to use silicon-containing minerals as a source of additional energy. The literature provides studies on the destruction of polysilicon compounds by silicate bacteria of the species silicate bacteria. They are capable of destroying quartz, aluminosilicates with the release of Si, K and other elements. There is also information about stimulating the reproduction of silicate bacteria when growing on mineral media with the addition of silicon-containing components. At the same time, the influence of polysilicon compounds on the synthesis of exopolysaccharides by silicate bacteria is not considered. The exopolysaccharides released by them are used in various industries: mining, oil production, pharmaceutical, food

---

© Улаханова Л. А., Гомбоева С. В., Цыренов В. Ж., 2023

\*Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.  
For complete information about the authors, see the last page of the article.

and cosmetic. The studies used isolated pure cultures of silicate bacteria, the biosynthetic activity of which was compared with strains of *Paenibacillus mucilaginosus* B7519 and B4901 (VKPM, GosNIIGenetics). Bacteria were isolated from the soils and sand of the Baikal region. The influence of silicon-containing components (bentonite, quartz sand) of the nutrient medium on crop growth and EPS synthesis was investigated. The positive effect of silicate minerals on the growth of isolated strains and museum cultures of *P. mucilaginosus* has been confirmed. Strain B-4901 had the highest amount of CFU/ml on nutrient media with both quartz sand and bentonite. The influence of silicon-containing components on the EPS yield of the studied microorganisms has been established. The highest EPS yield was observed in the VSGUTU-2 strain on a nutrient medium with the addition of quartz sand, and the B7519 strain had the best synthesis on a medium with the addition of bentonite. The VSGUTU-1 strain showed the same yield of exopolysaccharides on two variants of media with silicon-containing components, whereas the amount of EPS in the B4901 strain did not increase with the addition of bentonite and quartz sand. The lowest EPS yields were on nutrient media without the addition of a silicon source.

**Keywords:** silicate bacteria, *Paenibacillus mucilaginosus*, silicon-containing components, exopolysaccharides, biosynthesis.

---

**For citation:** Ulakhanova L.A., Gomboeva S.V., Tsyrenov V.Zh. Effect of Silicon-Containing Components of Nutrient Medium on the Synthesis of Exopolysaccharides by Silicate Bacteria. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2023, vol. 45, pp. 46-57. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.45.46> (in Russian)

---

### **Введение**

Силикатные бактерии впервые описаны В. Г. Александровым [1953] в 1939 г. Среди представителей этой группы наиболее полно изучен *Paenibacillus mucilaginosus*, краткие сведения имеются о *Bacillus circulans* [Osman, 2009], *B. cereus* [*Paenibacillus mucilaginosus* ... , 2013] и *P. edaphicus* [One plant ... , 2019], известны исследования комплексов силикатных бактерий [Козлов, Куликова, Уромова, 2017, 2019; Exploration of silicate ... , 2021]. Общими свойствами этих микроорганизмов являются образование капсулы полисахаридной природы и деструкция поликремниевых соединений для обеспечения жизнедеятельности [Александров, 1953; Васючков, 2011; Exploration of silicate ... , 2021].

Способность разрушать поликремниевые соединения играет очень важную роль в метаболизме силикатных бактерий [Няникова, Виноградов, 2000; Exploration of silicate ... , 2021]. Благодаря этому они способны переключаться от гетеротрофного типа питания к автотрофному [Воронков, 1984; Голохваст, 2010; Bin, Smith, Ping, 2000; Current knowledge ... , 2016]: в первом случае они используют органические соединения, лучше всего усваивая сахарозу и мальтозу; во втором – получают энергию при деструкции природных силикатов, а в качестве источника углерода могут использовать карбонаты и CO<sub>2</sub> из атмосферы [Няникова, Виноградов, 2000; Osman, 2009; *Bacillus mucilaginosus* ... , 2011; *Paenibacillus mucilaginosus* ... , 2013]. Разрушение поликремниевых соединений происходит за счёт окислительно-восстановительных ферментов бактериальных клеток. При этом они усваивают силикаты с правильной кристаллической решёткой, но не аморфные структуры. Наиболее легко и полно деструкции подвергаются алюмосиликаты, для которых характерны частичные замены ионов кремния на ионы алюминия [Александров, 1953; Яхонтова, Зверева, 2000].

Благодаря своим свойствам силикатные бактерии нашли широкое применение в сельском хозяйстве в качестве микробиологического удобрения [Osman, 2009; *Paenibacillus mucilaginosus* ... , 2013; Current knowledge ... , 2016; One plant ... , 2019]. Они способны переводить в растворимые формы калий, кремний, фосфор; синтезировать ростактивирующие вещества; фиксировать атмосферный азот [Няникова, Виноградов, 2000; Перспектива применения ... , 2020; Decomposition of ... , 2006; Bioremediation of silicon ... , 2020]. Помимо этого силикатные бактерии продуцируют экзополисахариды (ЭПС) [Liang, Wang, 2015; Liang, Tseng, Wang, 2016; Exopolysaccharides producing rhizobacteria ... , 2018], которые применяются в пищевой промышленности в качестве стабилизаторов и загустителей [Purification and characterization ... , 2018]; в горнодобыче – для бактериального выщелачивания минеральных руд [Васючков, 2011; Теляков, Салтыкова, Пурэвдаш, 2011]; в производстве керамики – для улучшения свойств минеральных материалов, алюмосиликатов [Голохваст, 2010; Козлов, Куликова, Уромова, 2017, 2019; Платова, Рыжакова, Платов, 2017]; для очистки сточных вод как биофлокулянты [Microbial flocculation ... , 2008]; а также как медицинские препараты-иммуномодуляторы [Няникова, Виноградов, 2000].

Исследования синтеза бактериальных полисахаридов (поиск новых продуцентов, подбор компонентов питательных сред для увеличения выхода продукта) ныне весьма актуальны [Knirel, Van Calsteren, 2021].

В настоящей работе оценивается потенциал увеличения эффективности синтеза ЭПС силикатными бактериями при добавлении кремнийсодержащих компонентов в синтетические питательные среды. Выдвинуто предположение, что при добавлении источников кремния микроорганизмы смогут использовать для обеспечения жизнедеятельности неорганические субстраты, а из органического субстрата производить ЭПС.

### **Материалы и методы**

Объектами исследования стали штаммы силикатных бактерий ВСГУТУ-1 и ВСГУТУ-2, выделенные из почв Байкальского региона, а также эталонные штаммы *Paenibacillus mucilaginosus* В7519 и В4901 (ВКПМ, ГосНИИгенетика).

Посевной материал выращивали на плотной питательной среде Зака в течение суток при 30 °С, взвесь культуры с оптической плотностью  $10^6$  КОЕ/мл<sup>1</sup> готовили в стерильном 0,9%-м растворе натрия хлорида. Культуры хранились на плотных питательных средах Зака следующего состава (г/дм<sup>3</sup>): MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O – 0,15; NaCl – 0,15; MnSO<sub>4</sub> – 0,05; FeSO<sub>4</sub> – 0,05; кремнийсодержащий компонент – 2,0; CaCO<sub>3</sub> – 2,0; Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> – 1,5; сахароза – 20,0; вода; агар – 1,5–2 % [Александров, 1953]. Культивирование микроорганизмов проводили глубинным методом в конических колбах объёмом 250 мл, содержащих 50 мл жидкой среды Зака. В качестве источников кремния использовали для силикатов – кварцевый песок, для алюмосиликатов –

<sup>1</sup> Методы контроля бактериологических питательных сред. Методические указания. МУК 4.2.2316-08. М. : ФЦ гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 67 с.

бентонит. Контролем служила питательная среда Зака без добавления кремнийсодержащих компонентов. Посевной материал вносился в количестве 5 % от объёма среды. Ферментацию проводили в течение двух суток при 250 об/мин и температуре 30 °С, рН 6,8–7,2 [Александров, 1953; Нетрусов, Егорова, Захарчук, 2005].

Посев проводили поверхностным методом на плотную среду Зака в чашках Петри, подсчёт сформировавшихся колоний осуществлялся по истечении двух суток. Количество клеток определяли методом Коха [Нетрусов, Егорова, Захарчук, 2005], содержание экзополисахаридов в культуральной жидкости – гравиметрическим методом. По окончании культивирования инокулят отделяли от биомассы на роторной центрифуге ЦРС-8 (Changsha Xiangzhi Centrifuge Instrument, Китай) при 6000 об/мин в течение 20 мин, супернатант отделяли от осадка, 10 мл жидкости осаждали двойным объёмом этанола, охлаждённого до 4 °С, раствор выдерживали в течение суток при той же температуре. Осаждённый полисахарид центрифугировали при 3000 об/мин в течение 20 мин, надосадочную жидкость сливали, к осадку добавляли 10 мл охлаждённого этанола и вновь центрифугировали, процедуру повторяли дважды. Затем осаждённый полисахарид переносили на высушенные и доведённые до постоянной массы фильтры, высушивали при 40 °С в течение суток и взвешивали на электронных аналитических весах ВЛТЭ-1100 (Госметр, Россия). Выход ЭПС оценивали в граммах на литр [Няникова, 2006; Новокупец, 2016].

Для определения количества углеводов проводили очистку полученного раствора (2,5 г неочищенного полисахарида растворяли в 50 мл воды, двукратно переосаждали этанолом), депротеинирование по методу Севага, диализ для удаления низкомолекулярных водорастворимых веществ. Очищенный раствор подвергали кислотному гидролизу 10н серной кислотой в течение двух часов. В гидролизованном растворе полисахаридов определяли редуцирующие вещества в пересчёте на глюкозу с помощью фенол-серного метода [Няникова, 2006; Фокина, Урядова, Карпунина, 2018].

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программы Excel из пакета MS Office 2019.

### ***Результаты и обсуждение***

На плотных безазотистых питательных средах силикатные бактерии образуют характерные колонии в виде капель воды [Александров, 1953]. Все исследованные штаммы образовывали характерного вида колонии – слизистые, прозрачные, круглые, выпуклые с ровными краями. Микроскопирование показало, что все штаммы палочковидные, грамположительные, образуют споры и капсулы полисахаридной природы, обладают силикатной активностью (табл. 1).

Известная способность силикатных бактерий расти на силикатах с кристаллической структурой позволила провести исследование роста и размножения штаммов в зависимости от содержания кремнийсодержащего компонента в питательной среде. В качестве компонентов были выбраны наиболее усвояемые и легкодоступные кварцевый песок и бентонит.

Таблица 1

Наблюдённые морфологические характеристики колоний и клеток исследованных штаммов силикатных бактерий

Характеристика	Штамм			
	ВСУТУ-1	ВСУТУ-2	В4901	В7519
Колонии				
Форма	Круглые выпуклые	Круглые выпуклые	Круглые выпуклые	Круглые выпуклые
Края	Ровные	Ровные	Ровные	Ровные
Цвет	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный
Внешний вид	Блестящие слизистые	Блестящие слизистые	Блестящие слизистые	Блестящие слизистые
Клетки				
Внешний вид	Короткие палочки	Короткие палочки	Длинные палочки	Длинные палочки
Окрашивание по Граму	+	+	+	+
Окрашивание по Трухильо	+	+	+	+
Образование капсул	+	+	+	+
Силиказная активность	+	+	+	+

Для всех исследованных штаммов наблюдалась положительная динамика роста при добавлении кремнийсодержащих компонентов в питательную среду. Наибольший выход биомассы наблюдался у коллекционного штамма В4901 –  $106,7 \cdot 10^9$  КОЕ на 1 л питательной среды с кварцевым песком и  $103,3 \cdot 10^9$  КОЕ/л на среде с бентонитом: почти вдвое больше, чем на среде без добавления кремнийсодержащих компонентов ( $48 \cdot 10^9$  КОЕ/л) (рис. 1). Число клеток штамма ВСУТУ-2 вдвое увеличилось в присутствии бентонита ( $27,6 \cdot 10^9$  КОЕ/л) и в 3,5 раза в присутствии кварцевого песка ( $43 \cdot 10^9$  КОЕ/л) по сравнению с контролем ( $12,3 \cdot 10^9$  КОЕ/л). Штамм В7519 показал наибольший прирост на среде с добавлением бентонита ( $19,8 \cdot 10^9$  КОЕ/л), что в 2,3 раза выше, чем на контрольной ( $8,5 \cdot 10^9$  КОЕ/л). У штамма ВСУТУ-1 сходные показатели в присутствии бентонита ( $35,6 \cdot 10^9$  КОЕ/л), что в 2,5 раза больше, чем на среде без участия кремния ( $14,5 \cdot 10^9$  КОЕ/л). Таким образом, у штаммов В7519 и ВСУТУ-1 наибольший выход биомассы наблюдался в присутствии бентонита, тогда как у ВСУТУ-2 – при добавлении кварцевого песка, а у штамма В4901 оказался примерно одинаковым на обоих компонентах.

Предполагают, что рост темпов размножения в присутствии кремнийсодержащих соединений обусловлен тем, что в качестве источника углерода бактерии используют карбонат кальция, а содержащиеся в среде углеводы используются для синтеза ЭПС. В связи с этим в эксперименте было изучено влияние источников кремния на этот процесс.

Наибольшее количество ЭПС (8,77 г/л) синтезировалось при культивировании штамма ВСУТУ-2 на питательной среде с добавлением кварцевого песка – почти в 2,5 раза больше, чем на среде без добавления кремнийсодержащих компонентов (3,45 г/л), на среде с добавлением бентонита показатель также оказался выше (5,43 г/л) (рис. 2). Штамм ВСУТУ-1 синтезирует практически одинаковое количество ЭПС на средах с бентонитом и кварцевым песком – 5,67 и 5,56 г/л соответственно.

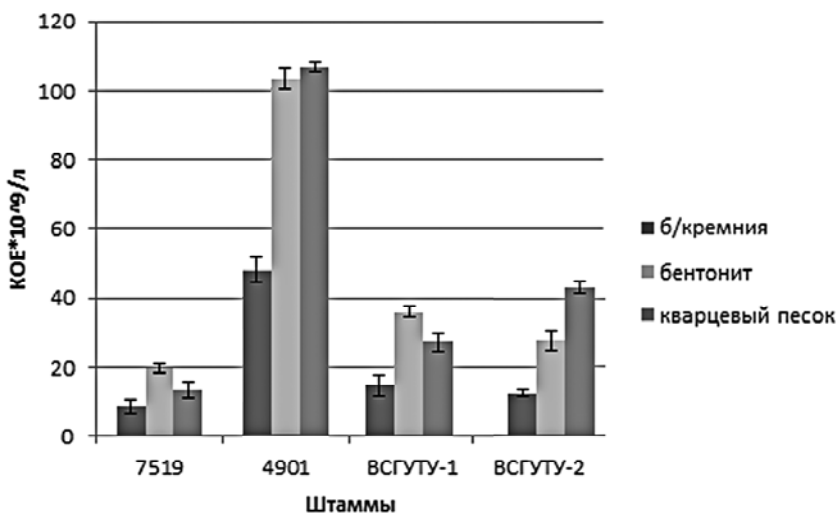


Рис. 1. Показатели численности клеток исследованных штаммов силикатных бактерий на питательных средах с кремнийсодержащими компонентами и без них

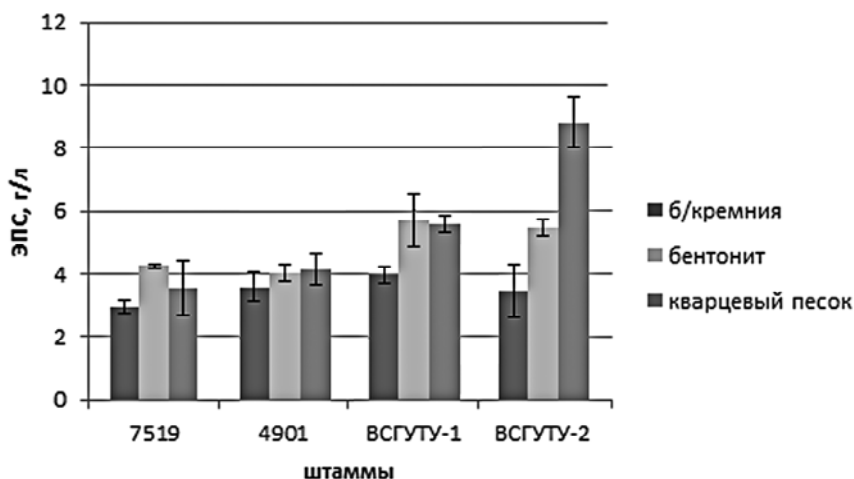


Рис. 2. Количество ЭПС (г/л), синтезируемых силикатными бактериями исследованных штаммов на питательных средах с кремнийсодержащими компонентами и без них

У штамма В7519 выход продуктов синтеза ЭПС на среде с песком воз- растал почти в 1,5 раза (4,25 г/л) по сравнению с контрольной средой (2,96 г/л). Выход ЭПС на средах с кремнийсодержащими компонентами и без них при культивировании штамма 4901 практически не изменялся.

Выход ЭПС у всех штаммов, выращенных на питательной среде без ис- точника кремния, варьирует в пределах от 2,75 до 4,28 г/л, с добавлением бентонита – от 3,81 до 6,51 г/л, с кварцевым песком – от 2,70 до 9,57 г/л.

При кислотном гидролизе полисахаридов может происходить неполный распад на моносахариды и могут образовываться другие соединения из гидролизатов. При выделении ЭПС могут присутствовать и балластные вещества. Сравнение содержания редуцирующих сахаров в гидролизованном растворе полисахаридов, синтезированных коллекционными (В7519, В4901) и природными (ВСГУТУ-1, ВСГУТУ-2) штаммами, проводили на питательной среде с добавлением кварцевого песка (рис. 3).

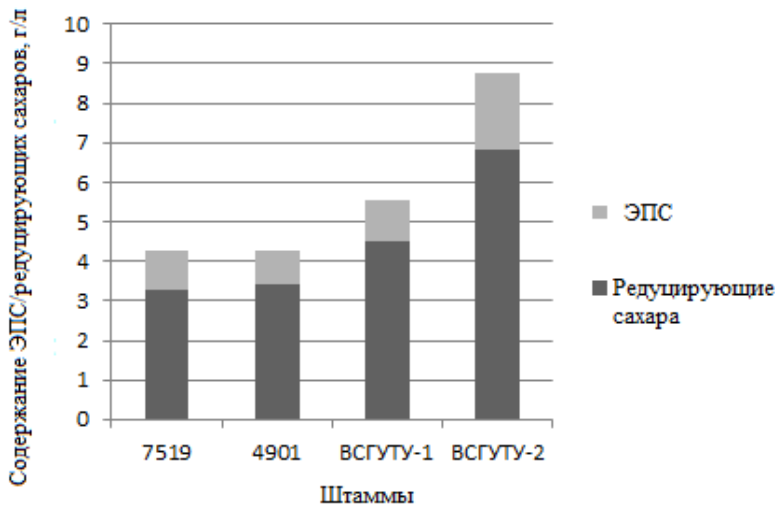


Рис. 3. Содержание экзополисахаридов и выделенных из них редуцирующих сахаров, синтезированных исследованными штаммами силикатных бактерий на питательной среде с добавлением кварцевого песка

Содержание редуцирующих веществ в пересчёте на глюкозу составляет примерно 80 % для всех штаммов. На балластные вещества приходится примерно 10 % от массы полисахаридов. Потери при очистке: двукратное переосаждение полисахаридов – 10 % от массы (5 % при каждом осаждении); депротенирование по методу Севага – 3 % от объёма (0,15 % от массы); диализ – 3 % от объёма (0,15 % от массы). Соответственно, около 10 % оставалось на потери при кислотном гидролизе. Это даёт основание предполагать, что в заданных условиях степень гидролиза полисахаридов, содержание балластных веществ и потери в процессах очистки были примерно равными.

Оценка удельного выхода ЭПС ( $\text{г}/1 \cdot 10^9 \text{ КОЕ}$ ), синтезированных разными штаммами (табл. 2), подтвердила общую тенденцию: чем меньше клеток образуется в процессе культивирования, тем выше выход ЭПС. На питательной среде без источника кремния наибольшее количество ЭПС выделяет штамм В7519, а наименьшее – штамм 4901. На питательных средах с кварцевым песком и бентонитом штаммы В7519 и ВСГУТУ-1 показывают примерно одинаковые результаты, а штамм ВСГУТУ-2 в присутствии бентонита имеет самый низкий показатель удельного выхода ЭПС.

Таблица 2

Показатели удельной продукции ЭПС ( $\text{г/л} \cdot 10^9 \text{ КОЕ}$ ),  
вырабатываемой силикатными бактериями разных штаммов  
на питательных средах с кремнийсодержащими компонентами и без них

Характеристика питательной среды	№ штамма			
	В7519	В4901	ВСГУТУ-1	ВСГУТУ-2
Без кремния	0,345±0,151	0,074±0,005	0,272±0,032	0,280±0,050
Кварцевый песок	0,265±0,025	0,034±0,006	0,213±0,009	0,193±0,008
Бентонит	0,225±0,005	0,040±0,001	0,163±0,017	0,0195±0,005

Возможно, это обусловлено повышением потребности в источнике углерода ( $\text{CaCO}_3$  и сахаразы) в результате увеличения численности микроорганизмов. Сахароза является субстратом и для роста клеток, и для синтеза ЭПС (в последнем случае – единственным). Согласно полученным результатам, добавление кремнийсодержащих компонентов в питательную среду обеспечило прирост биомассы от 1,8 до 3,5 раза (см. рис. 1), вследствие чего возросли потребности бактерий в углероде. Как известно, при росте микроорганизмов – продуцентов ЭПС углеводы, содержащиеся в питательной среде, расходуются в первую очередь для жизнедеятельности и размножения, а при условии их избытка используются для синтеза ЭПС [Няникова, Виноградов 2000]. Возможно, удельный ( $\text{г/л} \cdot 10^9 \text{ КОЕ}$ ) выход ЭПС при добавлении кремнийсодержащих соединений снижается в результате нехватки лимитирующего субстрата (сахарозы).

В целом наблюдалось положительное воздействие силикатных минералов на жизнедеятельность силикатных бактерий. Штамм В4901 показал наиболее высокие темпы роста на средах с добавлением кремнийсодержащих компонентов, однако его продукция ЭПС оказалась самой низкой. Штамм В7519 проявил высокий темп роста на среде с бентонитом и самую высокую синтетическую активность на всех питательных средах. Показатели продукции ЭПС на питательной среде без источника кремния штаммов ВСГУТУ-1 и ВСГУТУ-2 наиболее высоки и сравнимы с В7519, но в разы выше, чем у В4901.

### **Заключение**

Экспериментально доказано положительное влияние источников кремния на рост и жизнедеятельность силикатных бактерий и интенсивность синтеза ими ЭПС. При добавлении в питательную среду кремнийсодержащие компоненты интенсифицируют рост биомассы бактерий: наибольший прирост (3,5 раза) наблюдался у штамма ВСГУТУ-2 на среде с кварцевым песком, у штаммов ВСГУТУ-1 и В7519 – в 2,5 и 2,3 раза соответственно на среде с бентонитом, у штамма В4901 – в 2,2 раза на среде с кварцевым песком. Несмотря на то что удельный показатель ( $\text{г/л} \cdot 10^9 \text{ КОЕ}$ ) синтеза ЭПС снижался, при одинаковом содержании углеводов на питательных средах с добавлением кремнийсодержащих компонентов зарегистрировано увеличение общего ( $\text{г/л}$ ) выхода ЭПС.



Исследования подтвердили возможность применения кремнийсодержащих компонентов для увеличения биомассы силикатных бактерий. Перспективными представляются также исследования влияния различных концентраций углеводов в питательной среде с содержанием источников кремния на процессы интенсификации синтеза ЭПС силикатными бактериями.

### Список литературы

- Александров В. Г. Силикатные бактерии. М. : Сельхозгиз, 1953. 116 с.
- Васючков Ю. Ф. Биотехнология горных работ. М. : Горная книга, 2011. 351 с.
- Воронков М. Г., Кузнецов И. Г. Кремний в живой природе. Новосибирск : Наука, 1984. 157 с.
- Голохваст К. С. Взаимодействие организмов с минералами. Владивосток : Изд-во ДВГУ, 2010. 115 с.
- Козлов А. В., Куликова А. Х., Уромова И. П. Активность силикатных бактерий и *Bacillus mucilaginosus* в дерново-подзолистой почве в отношении деградации диатомита Инзенского месторождения // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2019. Т. 29. С. 3–14. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2019.29.3>
- Козлов А. В., Куликова А. Х., Уромова И. П. Продукты выщелачивания в бактериальной системе «Порода-культура» при биохимической деградации силикатными бактериями диатомита, цеолита и бентонита // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 2-2. С. 281–288
- Петрусов А. И., Егорова М. А., Захарчук Л. М. Практикум по микробиологии. М. : Академия, 2005. 603 с.
- Новокупцев Н. В. Оптимизация условий культивирования *Azotobacter vinelandii* Д-08 для увеличения выхода экзополисахарида // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. 2016. Т. 16, № 2. С. 164–168
- Няникова Г. Г., Виноградов Е. Я. *Bacillus mucilaginosus*. Перспективы использования. СПб. : НИИСХ : СПбГУ, 2000. 124 с.
- Няникова Г. Г. Биосинтез и изучение микробных полисахаридов: методические указания к лабораторным работам. СПб. : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2006. 22 с.
- Перспектива применения бактерий рода *Paenibacillus* в промышленной биотехнологии для получения биопрепаратов сельскохозяйственного назначения / Т. З. Ха, А. В. Канарский, З. А. Канарская, А. В. Щербаков, Е. Н. Щербакова // Вестник ПГТУ. Серия Лес. Экология. Природопользование. 2020. № 3. С. 47. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2020.3.74>
- Платова Р. А., Рыжакова А. В., Платов Ю. Т. Инновационная керамическая биотехнология: основные направления, способы ее применения и преимущества // Вестник Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. 2017. № 1 (91). С. 171–178.
- Теляков Н. М., Салтыкова С. Н., Пурэвдаш М. Изучение воздействия бактериального раствора на сульфидные медно-молибденовые руды // Записки Горного института. 2011. Т. 192. С. 54–57.
- Фокина Н. А., Урядова Г. Т., Карпунина Л. В. Влияние условий культивирования на продукцию экзополисахарида *Streptococcus thermophilus* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2018. Т. 18, № 2. С. 179–181. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-2-179-181>
- Яхонтова Л. К., Зверева В. П. Основы минералогии гипергенеза. Владивосток : Дальнаука, 2000. 331 с
- Bacillus mucilaginosus* can capture atmospheric CO<sub>2</sub> by carbonic anhydrase / Zh. Zhang, B. Lian, W. Hou, M. Chen, X. Li, Y. Li // Afr. J. Microbiol. 2011. Vol. 5, N 2. P 106–119.
- Bin L., Smith D. L., Ping F. Application and mechanism of silicate bacteria in agriculture and industry / Guizhou Sci. 2000. Vol. 18. P. 43–53.
- Bioleaching of silicon in electrolytic manganese residue (EMR) by *Paenibacillus mucilaginosus*: Impact of silicate mineral structures / Y. Lv, J. Li, H. Ye, D. Du, P. Sun, M. Ma, T. C. Zhang // Chemosphere. 2020. Vol. 256. 127043. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127043>

Current knowledge and perspectives of *Paenibacillus*: a review / E. N. Grady, J. McDonald, L. Liu, A. Richman, Yu. Ze-Chun // *Microb. Cell Fact.* 2016. Vol. 15. 203. <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0603-7>

Decomposition of silicate minerals by *Bacillus mucilaginosus* in liquid culture / W. Liu, X. Xu, X. Wu, Q. Yang, Y. Luo, P. Christie // *Environ. Geochem. Health.* 2006. Vol. 28. P. 133–140 <https://doi.org/10.1007/s10653-005-9022-0>

Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance / H. Naseem, M. Ahsan, M. A. Shahid, N. Khan // *J. Basic Microbiol.* 2018. Vol. 58, Is 12. P. 1009. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800309>

Exploration of silicate solubilizing bacteria for sustainable agriculture and silicon biogeochemical cycle / G. Raturi, Y. Sharma, V. Rana, V. Thakral, B. Myaka, P. Salvi, M. Singh, H. Dhar, R. Deshmukh // *Plant Physiol. Biochem.* 2021. Vol. 166. P. 827–838. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.039>

Knirel Y., Van Calsteren M.-R. Bacterial Exopolysaccharides // *Comprehensive Glycoscience.* 2021. Vol. 1. P. 21–95. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819475-1.00005-5>

Liang T.-W., Wang S.-L. Recent Advances in Exopolysaccharides from *Paenibacillus* spp.: Production, Isolation, Structure, and Bioactivities // *Marine Drugs.* 2015. Vol. 13, N 4. P. 1847–1863 <https://doi.org/10.3390/md13041847>

Liang T.-W., Tseng Sh.-Ch., Wang S.-L. Production and Characterization of Antioxidant Properties of Exopolysaccharide(s) from *Paenibacillus mucilaginosus* TKU032 // *Marine Drugs.* 2016. Vol. 14, N 2. P. 40. <https://doi.org/10.3390/md14020040>

Microbial flocculation by *Bacillus mucilaginosus*: applications and mechanisms / B. Lian, Y. Chen, J. Zhao, H. H. Teng, L. J. Zhu, S. Yuan // *Biores. Technol.* 2008. Vol. 99, Is. 11. P. 4825–4831. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.045>

One plant of colloid series bacillus N6 and its application. Patent CN № CN105950505B China.; appl. 20.05.2016 : publ.11.06.2019. Nanjing Forestry University.

Osman A. G. Study of some characteristics of silicate bacteria // *J. Sci. Technol.* 2009. Vol. 10, N 3. P. 24–31

*Paenibacillus mucilaginosus* and method for producing compound microorganism bacterium agent by utilizing same. Patent CN № CN103194410A China.; appl. 04.04.2013: publ. 10.07.2013 / Li Tseng, Chzao et al. Hebei Institute of Microbiology.

Purification and characterization of a highly viscous polysaccharide produced by *Paenibacillus* strain / X. Haiyang, J. Li, L. Wang, R. Fu, R. Cheng, Sh. Wang, J. Zhang // *Eur. Polym. J.* 2018. Vol. 101. P. 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.02.040>

## References

Aleksandrov V.G. *Silikatnye bakterii* [Silicate bacteria]. Moscow, Selkhozgiz Publ., 1953, 116 p. (in Russian)

Vasyuchkov Yu.F. *Biotehnologiya gornyykh rabot* [Biotechnology of mining operations]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2011, 351 p. (in Russian)

Voronkov M.G., Kuznetsov I.G. *Kremnii v zhivoi prirode* [Silicon in living nature]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 157 p. (in Russian)

Golokhvast K.S. *Vzaimodeistvie organizmov s mineralami* [Interaction of organisms with minerals]. Vladivostok, FESTU Publ., 2010, 115 p. (in Russian)

Kozlov A.V., Kulikova A.H., Uromova I.P. Aktivnost' silikatnykh bakterii i *Bacillus mucilaginosus* v dernovo-podzolistoi pochve v otnoshenii degradatsii diatomita Inzenskogo mestorozhdeniya [Activity of silicate bacteria and *Bacillus mucilaginosus* in sod-podzolic soil in relation to the degradation of diatomite of the Inzen deposit]. *Bull. Irkutsk St. Univ. Ser. Biol. Ecol.*, 2019, vol.29, pp. 3-14. (in Russian). <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2019.29.3>

Kozlov A.V., Kulikova A.H., Uromova I.P. Produkty vyshchelachivaniya v bakterial'noi sisteme «Poroda-kul'tura» pri biokhimicheskoi degradatsii silikatnymi bakteriyami diatomita, tselolita i bentonita [Leaching products in the bacterial system “Breed-culture” during biochemical degradation by silicate bacteria of diatomite, zeolite and bentonite]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 19, no. 2-2, pp. 281-288. (in Russian)

Netrusov A.I., Egorova M.A., Zakharchuk L.M. *Praktikum po mikrobiologii* [Microbiology workshop]. Moscow, Academia Publ., 2005. 603 p. (in Russian)

Novokuptsev N.V. Optimizatsiya uslovii kultivirovaniya Azotobacter vinelandii D-08 dlya uvelicheniya vykhoda ekzopolisakharida [Optimization of cultivation conditions of Azotobacter vinelandii D-08 to increase the yield of exopolysaccharide]. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 164-168. (in Russian)

Nyanikova G.G., Vinogradov E.Y. *Bacillus mucilaginosus. Perspektivy ispolzovaniya* [Bacillus mucilaginosus. Prospects of use]. St.-Petersb., St. Petersburg. St. Univ. Publ., 2000, 124 p. (in Russian)

Nyanikova G.G. *Biosintez i izuchenie mikrobykh polisakharidov: metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam* [Biosynthesis and study of microbial polysaccharides: guidelines for laboratory work]. St. Petersburg, St. Petersburg. St. Technol. Univ. Publ., 2006, 22 p. (in Russian)

Ha T.Z., Kanarsky A.V., Kanarskaya Z.A., Shcherbakov A.V., Shcherbakova E.N. Perspektiva primeneniya bakterii roda Paenibacillus v promyshlennoi biotekhnologii dlya polucheniya biopreparatov selskokhozyaistvennogo naznacheniya [Prospect of using bacteria of the genus Paenibacillus in industrial biotechnology for the production of biological products for agricultural purposes]. *Vestnik of Volga St. Univ. Technol. Ser. Forest. Ecology. Nature Management*, 2020, no. 3, p. 47. (in Russian). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2020.3.74>

Platova R.A., Ryzhakova A.V., Platov Y.T. Innovative ceramic biotechnology: main directions, methods of its application and advantages [Innovatsionnaya keramicheskaya biotekhnologiya: osnovnye napravleniya, sposoby ee primeneniya i preimushchestva]. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 2017, no. 1 (91), pp. 171-178. (in Russian)

Telyakov N.M., Saltykova S.N., Purevdash M. Izuchenie vozdeistviya bakterial'nogo rastvora na sulfidnye medno-molibdenovye rudy [Studying the effects of bacterial solution on sulfide copper-molybdenum ores]. *J. Mining Inst.*, 2011, vol. 192, pp. 54-57. (in Russian)

Fokina N.A., Uryadova G.T., Karpunina L.V. Influence of cultivation conditions on the production of Streptococcus thermophilus exopolysaccharide [Vliyaniye uslovii kultivirovaniya na produktsiyu ekzopolisakharida Streptococcus thermophilus]. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 179-181. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-2-179-181> (in Russian)

Yakhontova L.K., Zvereva V.P. *Osnovy mineralogii gipergeneza* [Fundamentals of hypergenesis mineralogy]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2000, 331 p. (in Russian)

Zhang Zh., Lian B., Hou W., Chen M., Li X., Li Y. Bacillus mucilaginosus can capture atmospheric CO<sub>2</sub> by carbonic anhydrase. *Afr. J. Microbiol.*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 106-119.

Bin L., Smith D.L., Ping F. Application and mechanism of silicate bacteria in agriculture and industry. *Guizhou Sci.*, 2000, vol. 18, pp. 43-53.

Lv Y., Li J., Ye H., Du D., Sun P., Ma M., Zhang T.C. Bioleaching of silicon in electrolytic manganese residue (EMR) by Paenibacillus mucilaginosus: Impact of silicate mineral structures. *Chemosphere*, 2020, vol. 256, 127043. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127043>

Grady E.N., McDonald J., Liu L., Richman A., Ze-Chun Yu. Current knowledge and perspectives of Paenibacillus: a review. *Microb. Cell Fact.*, 2016, vol. 15, 203. <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0603-7>

Liu W., Xu X., Wu X., Yang Q., Luo Y., Christie P. Decomposition of silicate minerals by *Bacillus mucilaginosus* in liquid culture. *Environ. Geochem. Health.*, 2006, vol. 28, pp. 133-140 <https://doi.org/10.1007/s10653-005-9022-0>

Naseem H., Ahsan M., Shahid M. A., Khan N. Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance. *J. Basic Microbiol.*, 2018, vol. 58, is. 12, p. 1009. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800309>

Raturi G., Sharma Y., Rana V., Thakral V., Myaka B., Salvi P., Singh M., Dhar H., Deshmukh R. Exploration of silicate solubilizing bacteria for sustainable agriculture and silicon biogeochemical cycle. *Plant Physiol. Biochem.*, 2021, vol. 166, pp. 827-838. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.039>

Knirel Y., Van Calsteren M.-R. Bacterial Exopolysaccharides. *Comprehensive Glycoscience*, 2021, vol. 1, pp. 21-95. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819475-1.00005-5>

Liang T.-W., Wang S.-L. Recent Advances in Exopolysaccharides from Paenibacillus spp.: Production, Isolation, Structure, and Bioactivities. *Marine Drugs*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 1847-1863. <https://doi.org/10.3390/md13041847>

Liang T.-W., Tseng Sh.-Ch., Wang S.-L. Production and Characterization of Antioxidant Properties of Exopolysaccharide(s) from *Paenibacillus mucilaginosus* TKU032. *Marine Drugs*, 2016, vol.14, no. 2, p. 40. <https://doi.org/10.3390/md14020040>

Lian B., Chen Y., Zhao J., Teng H.H., Zhu L.J., Yuan S. Microbial flocculation by *Bacillus mucilaginosus*: applications and mechanisms. *Biores. Technol.*, 2008, vol. 99, is. 11, pp. 4825-4831. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.045>

*One plant of colloid series bacillus N6 and its application*. Patent CN № CN105950505B China.; appl. 20.05.2016, publ.11.06.2019. Nanjing Forestry University,

Osman A. G. Study of some characteristics of silicate bacteria. *J. Sci. Technol.*, 2009, vol. 10, no. 3, pp. 24-31.

*Paenibacillus mucilaginosus* and method for producing compound microorganism bacterium agent by utilizing same. Patent CN № CN103194410A China.; appl. 04.04.2013, publ. 10.07.2013. Li, Tseng, Chzao et.al. Hebei Institute of Microbiology.

Haiyang X., Li J., Wang L., Fu R., Cheng R. Wang Sh., Zhang J. Purification and characterization of a highly viscous polysaccharide produced by *Paenibacillus* strain. *Eur. Polym. J.*, 2018, vol. 101, pp. 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.02.040>

#### Сведения об авторах

**Улаханова Людмила Алексеевна**

преподаватель

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
Россия, 670013, ул. Ключевская, 42Б, стр. 4  
e-mail: [ulahanova@mail.ru](mailto:ulahanova@mail.ru)

**Гомбоева Саяна Владимировна**

кандидат биологических наук, доцент

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
Россия, 670013, ул. Ключевская, 42Б, стр. 4  
e-mail: [sv2@rambler.ru](mailto:sv2@rambler.ru)

**Цыренов Владимир Жигжитович**

доктор биологических наук, профессор,

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
Россия, 670013, ул. Ключевская, 42Б, стр. 4  
e-mail: [vtsyrenov@gmail.com](mailto:vtsyrenov@gmail.com)

#### Information about the authors

**Ulakhanova Lyudmila Alekseevna**

Lecturer

East Siberian State University of Technology and Management  
42B, building 4, Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation  
e-mail: [ulahanova@mail.ru](mailto:ulahanova@mail.ru)

**Gomboeva Sayana Vladimirovna**

Candidate of Sciences (Biology),

Associate Professor  
East Siberian State University of Technology and Management  
42B, building 4, Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation  
e-mail: [sv2@rambler.ru](mailto:sv2@rambler.ru)

**Tsyrenov Vladimir Zhigzhitovich**

Doctor of Sciences (Biology), Professor

East Siberian State University of Technology and Management  
42B, building 4, Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation  
e-mail: [vtsyrenov@gmail.com](mailto:vtsyrenov@gmail.com)