

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 579.222.2

doi: 10.17223/19988591/45/11

Т.З. Есикова

Федеральный исследовательский центр «Пуцинский научный центр
биологических исследований РАН», Институт биохимии и физиологии
микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН, г. Пузино, Россия

Определение оптимальных условий роста грамположительной бактерии *Gulosibacter* sp. BS38 – деструктора токсичного ксенобиотика *epsilon*-капролактама

Использование микроорганизмов – специфических деструкторов ксенобиотиков для биологической очистки производственных отходов предполагает предварительный отбор наиболее активных в отношении исследуемых субстратов штаммов на основе изучения физиологии их роста на селективных средах. Изучено влияние физико-химических факторов культивирования (температура, pH среды и концентрация субстрата) на параметры роста грамположительной бактерии *Gulosibacter* sp. BS38 – деструктора токсичного неприродного соединения *epsilon*-капролактама. Культивирование штамма BS38 осуществляли в жидкой минеральной среде Эванса, содержащей ксенобиотик в качестве единственного источника углерода и энергии. Показано, что штамм BS38 растет в широком диапазоне концентраций капролактама – от 0,5 до 12,0 г/л, оптимально при 1,0–2,0 г/л, pH 7,5 и температуре 28°C. Штамм BS38 способен расти при высоких концентрациях токсичного поллютанта, является мезофильным и алкалотолерантным организмом, что определяет перспективы его использования в технологиях биологической очистки отходов производств капролактама и полимеров, получаемых на его основе.

Ключевые слова: биodeградация; биоремедиация; деструкция ксенобиотиков; культивирование; капролактама.

Введение

Интенсивное развитие химической промышленности и промышленного производства в целом привело к тому, что различные неприродные химические соединения, токсичные для живых организмов, в больших количествах попадают в окружающую среду. Одним из распространенных поллютантов является *epsilon*-капролактама (далее – капролактама, КАП), ежегодное ми-

ровое производство которого достигает миллионов тонн. Это связано с разнообразными сферами применения получаемых на его основе полимерных материалов (нейлон-6) в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, медицины и быта. В процессе производства и полимеризации КАП образуются отходы, содержащие определенное количество капролактама и низкомолекулярных фракций олигомеров [1]. В настоящее время производственные отходы сжигаются или подвергаются захоронению, что приводит к загрязнению почв и грунтовых вод токсичными поллютантами. По литературным данным, КАП вызывает дерматиты, лихорадку и судороги у людей [1], индуцирует хромосомные aberrации у млекопитающих [2], а также ингибирует рост микроорганизмов, играющих важную роль в поддержании экологического равновесия почв [3]. Отсутствие системных исследований микробных деструкторов КАП является фактором, сдерживающим развитие экологических и экономически выгодных технологий биологической очистки производственных отходов и биоремедиации загрязненных почв.

Первоначально способность разлагать КАП обнаружена у бактерий рода *Pseudomonas*, которые, как известно, способны утилизировать широкий спектр органических соединений, в том числе токсичные поллютанты [4]. Позднее мы показали, что способность бактерий *Pseudomonas* к деградации КАП детерминруется CAP плазмидами, которые содержат генетическую информацию, необходимую для полной минерализации ксенобиотика [5]. В настоящее время описаны капролактама-утилизирующие бактерии, относящиеся к различным таксономическим группам, однако существуют лишь единичные сообщения о грамположительных бактериях-деструкторах [6]. Особенности биodeградации КАП различными бактериальными штаммами, их разнообразие и филогения остаются мало изученными.

Известно, что эффективному микробному разложению ксенобиотиков в загрязненных почвах препятствуют такие факторы, как неоптимальные значения pH, температуры, а также высокое содержание токсичных поллютантов. По этой причине не все микроорганизмы-деструкторы могут быть использованы в технологиях очистки окружающей среды. Выделение новых штаммов-деструкторов ксенобиотиков, изучение физиологии их роста на селективных средах при различных условиях может рассматриваться как первый шаг исследования их потенциальных возможностей для использования в биологической очистке производственных отходов. Цель работы – изучить характер роста бактерии-деструктора *Gulosibacter* sp. BS38 в минеральной среде с капролактамом в качестве единственного источника углерода и энергии в зависимости от концентрации субстрата, pH среды и температуры.

Материалы и методики исследования

Штамм-деструктор *Gulosibacter* sp. BS38 (JN787120) выделен ранее из почвенных образцов, загрязненных отходами производства КАП и нейло-

на-6 «ОАО ЩекиноАзот» (г. Щекино, Тульская область), методом накопительной культуры [7]. Исследуемый штамм утилизировал КАП в качестве единственного источника углерода и энергии в отличие от ранее описанных бактерий-деструкторов, требующих для деградации ксенобиотика дополнительных источников углерода или факторов роста [8].

При изучении влияния условий культивирования на рост штамма оценивали такие параметры, как оптическая плотность (ОП), длительность лаг-фазы, а также максимальная удельная скорость роста культуры (μ_{\max}). Для определения условий оптимального роста штамма BS38 использовали жидкую минеральную среду Эванса [7], варьируя в зависимости от задачи эксперимента температуру, значение pH или количество субстрата в среде. Клетки культивировали в колбах Эрленмейера объемом 750 мл, содержащих 100 мл среды, в течение 100–120 ч в шейкере-инкубаторе («Multitron Pro», Швейцария) при 180 об/мин. Интенсивность роста культур оценивали спектрофотометрически по изменению ОП («UV Specord», Германия) при длине волны 590 нм. В качестве инокулята использовали культуру, выращенную на этой же среде (pH 7,5, температура культивирования 28°C, концентрация КАП 1,0 г/л) до оптической плотности 0,5, что по предварительным данным соответствовало примерно середине экспоненциальной фазы роста. Клетки осаждали центрифугированием («Rotanta 460R», Германия) при 5000g, в течение 10 мин и вносили в колбы со стерильной средой до ОП 0,05.

Температурный диапазон и оптимум определяли при 15, 28 и 37°C. В этом случае концентрация КАП составляла 1,0 г/л, а pH среды 7,5. Влияние pH на рост культуры оценивали в интервале от 6,0 до 10,0 с шагом в 0,5 единицы при температуре 28°C. Изменения pH среды осуществляли добавлением 3М NaOH или 1М HCl, после чего стерильно вносили раствор КАП до конечной концентрации 1,0 г/л. Для изучения влияния концентрации КАП на рост исследуемого штамма субстрат вносили в среду в количестве 0,5 и далее от 1,0 до 15,0 г/л (вес/об), увеличивая концентрацию ксенобиотика на 1,0 г/л. Бактерии культивировали при температуре 28°C и pH среды 7,5.

Каждый вариант опыта выполнен в трех биологических повторностях. Для каждого значения ОП вычислены среднее арифметическое и стандартная ошибка среднего арифметического. Статистическая обработка полученных данных и построение графиков выполнены в программе Microsoft Excel 2007. По полученным кривым роста вычисляли длительность лаг-периода и максимальную удельную скорость в экспоненциальной фазе роста по формуле

$$\mu_{\max} = \frac{\ln X_1 - \ln X_0}{t_1 - t_0},$$

где X_0 и X_1 – значения биомассы, соответствующие времени роста t_0 и t_1 . Об увеличении биомассы судили по изменению оптической плотности культуральной жидкости [9].

Результаты исследования и обсуждение

Проведенное ранее изучение морфологических, физиолого-биохимических признаков, а также анализ нуклеотидной последовательности гена 16S рРНК штамма BS38 показало, что он является представителем класса *Actinobacteria* и относится к роду *Gulosibacter* [7]. Как известно, актинобактерии способны разлагать широкий спектр природных и man-made органических соединений [10], однако штамм-деструктор КАП, относящийся к роду *Gulosibacter*, описан впервые. Примечательно, что род *Gulosibacter* выделен в самостоятельный недавно и представлен в настоящее время всего 2 штаммами, причем один из них – *G. molinativorax* ON4^T, выделенный в Португалии, способен осуществлять деградацию гербицида молината [11]. Интересно, что КАП является промежуточным продуктом разложения молината. Дальнейшее превращение КАП у *G. molinativorax* ON4^T и *Gulosibacter* sp. BS38 происходит, по всей видимости, по общему биохимическому пути. Видовой статус штамма *Gulosibacter* sp. BS38 требует уточнения, поскольку высока вероятность принадлежности штамма BS38 к виду *G. molinativorax*.

Возможность применения микроорганизмов для биологической очистки производственных отходов, содержащих КАП, в настоящее время только исследуется. Показано, что скорость и степень деградации КАП в сточных водах в первую очередь зависят от концентрации ксенобиотика [12]. По имеющимся данным, количество КАП в стоках может варьировать от 1 360 до 3 600 мг/л в зависимости от конкретного предприятия [1, 2], поэтому толерантность микроорганизмов-деструкторов к высоким концентрациям ксенобиотика может иметь принципиальное значение для их использования в технологиях биологической очистки отходов. Следует отметить, что концентрация КАП, оптимальная для большинства описанных бактерий-деструкторов, составляет 1,0–2,0 г/л [13–15]. Так, увеличение концентрации поллютанта до 5,0 г/л приводило к существенному снижению скорости роста и урожая клеток у бактерий *Pseudomonas*, а при концентрации КАП 10,0 г/л их рост полностью прекращался [13]. Максимальное количество КАП, при котором наблюдался рост бактерий *Arthrobacter citreus* и *Alcaligenes faecalis*, – 5,0 и 6,0 г/л соответственно [14], а штамм *Proteus* sp. NTS2 демонстрировал слабый рост при 10,0 г/л субстрата в среде [15].

Изучение ингибирующего влияния капролактама на рост исследуемого штамма проводили в диапазоне концентраций от 0,5 до 15,0 г/л. Длительность лаг-фазы при концентрации КАП 0,5 г/л минимальна (5 ч) по сравнению с другими вариантами опыта. Культура быстро достигала стационарной фазы роста, однако ОП культуры невысокая (0,55), что может свидетельствовать об исчерпании субстрата (рис. 1, А). Максимальная удельная скорость роста в этом случае составляла 0,057 ч⁻¹. При концентрации КАП 1,0 и 2,0 г/л культура достигала наибольших значений ОП (0,71 и 0,73), удельная скорость роста также максимальная – 0,094 и 0,086 ч⁻¹ соответственно. Несмотря на

то, что рост штамма начинался после более длительного лаг-периода (около 15 ч), можно считать эти концентрации субстрата оптимальными. Дальнейшее повышение количества КАП в среде сопровождалось пропорциональным увеличением лаг-периода, замедлением удельной скорости роста, а также уменьшением оптической плотности культуры. При концентрации субстрата 10,0 г/л наблюдалось резкое снижение удельной скорости роста культуры (μ_{\max} 0,039 ч⁻¹), однако он не прекратился полностью. Максимальное количество КАП, при котором еще сохранялся рост бактерий, составило 12,0 г/л, что выше, чем у описанных ранее бактерий-деструкторов КАП [13–15]. Длительность лаг-фазы в этом случае достигала 33–34 ч, ОП – 0,29, а μ_{\max} – 0,018 ч⁻¹. Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследуемый штамм способен расти при высоких концентрациях токсичного субстрата и может быть использован для очистки стоков, содержащих поллютант в широком диапазоне концентраций.

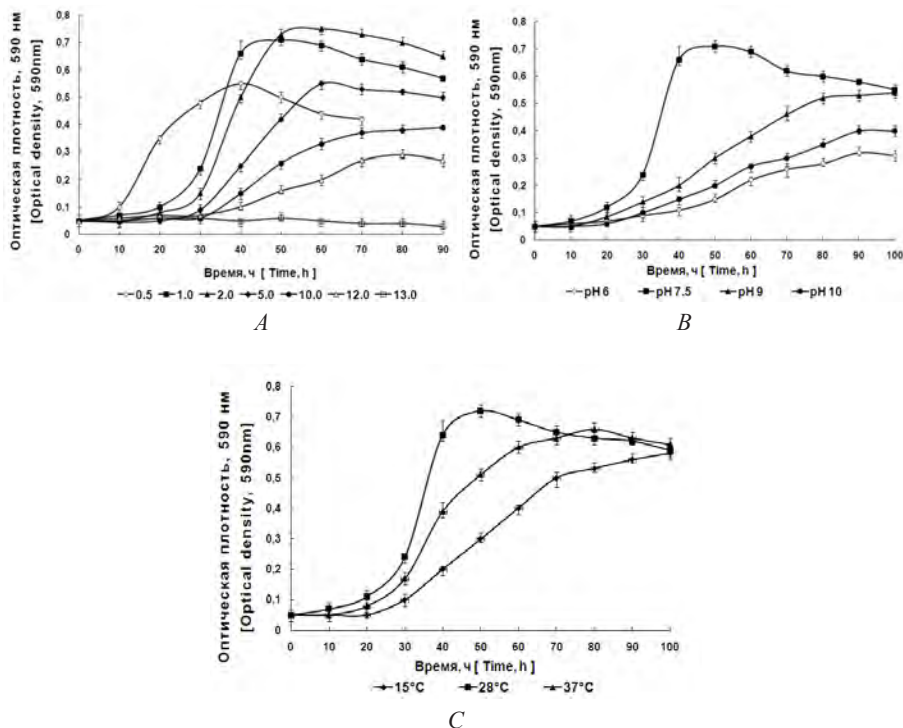


Рис. 1. Динамика роста штамма *Gulosibacter* sp. BS38 в жидкой минеральной среде при различных концентрациях ϵ -капролактама (г/л) (А), pH среды (В) и температуре культивирования (С). Представлены усредненные по трем измерениям данные с доверительными интервалами)

[Fig. 1. Growth dynamics of *Gulosibacter* sp. BS38 in a liquid mineral medium at different ϵ -caprolactam concentrations, g/L (A), initial pH of the medium (B) and incubation temperature (C)]

Изучение влияния pH и температуры культивирования на параметры роста штамма BS38 проводили при концентрации субстрата 1,0 г/л. Установлено, что лучший рост культуры наблюдался при 28°C и pH 7,5 (рис. 1, B, C). При этом температура культивирования преимущественно влияла на удельную скорость роста культуры (μ_{\max} 0,094, 0,052 и 0,038 ч⁻¹ при 28, 37 и 15°C соответственно), тогда как изменение pH среды приводило также к значительному увеличению длительности лаг-фазы и снижению ОП (рис. 1, B). Следует отметить, что удельная скорость роста клеток и ОП культуры выше при значениях pH 9,0 и 10,0 (μ_{\max} 0,036 и 0,024 ч⁻¹), чем при pH 6,0 (μ_{\max} 0,019 ч⁻¹), что позволило отнести исследуемый штамм к алкалотолерантным бактериям. Поскольку стоки, образующиеся при производстве и переработке КАП, представляют собой щелочные растворы [16], то алкалотолерантные бактерии-деструкторы являются наиболее перспективными для использования в биотехнологиях очистки производственных отходов.

Заключение

В данном исследовании установлено, что новый грамположительный штамм-деструктор *Gulosibacter* sp. BS38 обладает уникальной способностью использовать *epsilon*-капролактam в качестве единственного источника углерода в широком диапазоне значений температуры, pH среды и концентрации субстрата. Выявлено, что количество токсичного субстрата и показатель pH среды оказывают существенное влияние на удельную скорость роста, длительность лаг-фазы и оптическую плотность, тогда как температура культивирования преимущественно влияет только на удельную скорость роста культуры. Подобраны оптимальные условия культивирования бактерии: pH 7,5, температура 28°C, концентрация субстрата 1,0–2,0 г/л. Полученные в данной работе результаты являются основой для дальнейшего исследования возможности применения штамма *Gulosibacter* sp. BS38 для биологической очистки производственных отходов предприятий по производству *epsilon*-капролактама и полимеров на его основе.

Литература

1. Понаморева О.Н. Методы определения капролактама и олигомеров в водных средах // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2017. № 1. С. 3–11.
2. Esikova T.Z., Ponomareva O.N., Baskunov B.P., Taran S.A., Boronin A.M. Transformation of low-molecular linear caprolactam oligomers by caprolactam-degrading bacteria // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2012. № 87. PP. 1284–1290. doi: [10.1002/jctb.3789](https://doi.org/10.1002/jctb.3789)
3. Baxi N.N. Influence of ϵ -caprolactam on growth and physiology of environmental bacteria // Annals of Microbiology. 2013. № 63. PP. 1471–1476. doi: [10.1007/s13213-013-0610-4](https://doi.org/10.1007/s13213-013-0610-4)
4. Boronin A.M., Kosheleva I.A. The role of catabolic plasmids in biodegradation of petroleum hydrocarbons // Current environmental issues and challenges / ed. by C. Giacomo, O. Roberto. Dordrecht : Springer, 2014. PP. 159–168.

5. Есикова Т.З., Волкова О.В., Таран С.А., Боронин А.М. Ключевая роль *dca*-генов в катаболизме *epsilon*-капролактама у бактерий рода *Pseudomonas* // Микробиология. 2015. Т. 84, № 5. С. 616–619. doi: [10.7868/S0026365615050079](https://doi.org/10.7868/S0026365615050079)
6. Otzen M., Palacio C., Janssen D.B. Characterization of the caprolactam degradation pathway in *Pseudomonas jessenii* using mass spectrometry-based proteomics // Applied Microbiology and Biotechnology. 2018. Vol. 102, № 15. PP. 6699–6711. doi: [10.1007/s00253-018-9073-7](https://doi.org/10.1007/s00253-018-9073-7)
7. Есикова Т.З., Акатова Е.В., Таран С.А. Бактерии-деструкторы низкомолекулярных линейных олигомеров *epsilon*-капролактама // Прикладная биохимия и микробиология. 2014. № 5. С. 481–489. doi: [10.7868/S55510991450043](https://doi.org/10.7868/S55510991450043)
8. Wang C.C., Lee C.M. Isolation of the ϵ -caprolactam denitrifying bacteria from a wastewater treatment system manufactured with acrylonitrile-butadiene-styrene resin // Journal of Hazardous Materials. 2007. № 145. PP. 136–141. doi: [10.1016/j.jhazmat.2006.10.092](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.092)
9. Биотехнология. Автоматизация биотехнологических исследований / Д.В. Зудин, В.М. Кантере, Г.А. Угодчиков ; под ред. Н.С. Егорова. М. : Высшая школа, 1987. 112 с.
10. Соляникова И.П., Головлева Л.А. Физиолого-биохимические свойства актинобактерий как основа их высокой биodeградативной активности // Прикладная биохимия и микробиология. 2015. Т. 51, № 2. С. 132–139. doi: [10.7868/S0555109915020208](https://doi.org/10.7868/S0555109915020208)
11. Estevinho B.N., Lopes A.R., Sousa V., Rocha F., Nunes O.C. Microencapsulation of *Gulosibacter molinivorax* ON4^T cells by a spray-drying process using different biopolymers // Journal of hazardous materials. 2017. Vol. 15, № 338. PP. 85–92. doi: [10.1016/j.jhazmat.2017.05.018](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.018)
12. Fortmann L., Rosenberg A. // Fate of ϵ -caprolactam in the aquatic environment. Chemosphere. 1984. Vol. 13. PP. 53–65. doi: [10.1016/0045-6535\(84\)90008-0](https://doi.org/10.1016/0045-6535(84)90008-0)
13. Boronin A.M., Naumova R.P., Grishchenkov V.G., Ilijinskaya O.N. Plasmids specifying ϵ -caprolactam degradation in *Pseudomonas* strains // FEMS Microbiology Letters. 1984. Vol. 22. PP. 167–170.
14. Sanuth H.A., Yadav A., Fagade O.E., Shouche Y. E-Caprolactam utilization by *Proteus* sp. and *Bordetella* sp. isolated from solid waste dumpsites in Lagos state, Nigeria, first report // Indian J Microbiol. 2013. Vol. 53. PP. 221–226. doi: [10.1007/s12088-013-0356-5](https://doi.org/10.1007/s12088-013-0356-5)
15. Baxi N.N., Shah A.K. Biological treatment of the components of solid oligomeric waste from a nylon-6 production plant // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2000. Vol. 16. PP. 835–840. doi: [10.1023/A:1008971216941](https://doi.org/10.1023/A:1008971216941)
16. Соколов А.Б., Печатников М.Г., Крижановский А.С., Петров Г.Г. Комбинирование химических и биологических способов очистки капролактама содержащих стоков // Российский химический журнал имени Д.И. Менделеева. 2006. Т. 50, № 3. С. 48–55.

Поступила в редакцию 24.08.2018 г.; повторно 05.12.2018 г.;
принята 15.02.2019 г.; опубликована 21.03.2019 г.

Есикова Татьяна Зигфридовна – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории биологии плазмид, Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН (142290, Россия, г. Пущино, пр. Науки, д. 5).
E-mail: das3534@rambler.ru

For citation: Esikova TZ. Determination of optimal growth conditions for gram-positive bacterium *Gulosibacter* sp. BS38, destructor of toxic xenobiotic *epsilon*-caprolactam. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2019;45:210-219. doi: [10.17223/19988591/44/11](https://doi.org/10.17223/19988591/44/11) In Russian, English Summary

Tatiana Z. Esikova

Federal Scientific Centre "Pushchinsky Scientific Centre of Biological Research, Russian Academy of Sciences", GK Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms, Pushchino, Russian Federation

Determination of optimal growth conditions for gram-positive bacterium *Gulosibacter* sp. BS38, destructor of toxic xenobiotic *epsilon*-caprolactam

Caprolactam is one of the widespread pollutants; its annual world production is in millions of tons. In the process of production and polymerization of CAP, wastes are generated that contain a certain amount of caprolactam and low molecular weight fractions of oligomers. Currently, industrial waste is incinerated or disposed of, which leads to pollution of soil and groundwater with toxic pollutants. A lack of systematic studies on microbial destructors of caprolactam is a limiting factor in the development of cost-effective technologies for biological treatment of industrial wastewaters. The aim of this research was to explore the growth pattern of the strain-destructor *Gulosibacter* sp. BS38 in a mineral medium containing caprolactam as a sole carbon and energy source at different substrate concentrations, pH and temperatures.

In order to determine the optimum growth conditions, liquid mineral medium was used at temperature range, pH value or substrate concentration according to the objective of the experiment. When studying the effect of cultivation conditions on the strain growth, such parameters as optical density (OD), the length of the lag-phase and the maximum specific growth rate of the culture (μ_{\max}) were assessed. Cells were cultured in 750 ml Erlenmeyer flasks, containing 100 ml of the medium, during 100-120 hours in an incubator shaker at 180 rpm. As the inoculum, a culture grown in the same medium (pH 7.5, cultivation temperature 28°C, CAP concentration 1.0 g/l) was used up to an optical density equivalent to 0.5. The intensity of culture growth was estimated spectrophotometrically by the change in the optical density (wavelength = 590 nm); the curve of growth patterns was used to calculate the length of the lag-phase and the maximum specific growth rate.

According to literature data, the rate and degree of caprolactam degradation in wastewater, first, depends on the amount of this compound, hence the tolerance of the microorganisms-destructors to high concentrations of caprolactam can be critical in practical use. The strain BS38 was able to grow on this xenobiotic compound, the concentration of which was widely ranging from 0.5 to 12.0 g/l. In the presence of 0.5 g/l, the length of the growth lag-phase was the shortest (5 hours) compared to those observed at higher concentrations (See Fig. 1A), but the optical density was not high (0.55). The maximum specific growth rate was 0.057 h⁻¹. When substrate concentration was 1.0 and 2.0 g/l, the optical density was maximum, 0.71 and 0.73; it was the same for the specific growth rate (0.094 and 0.086 h⁻¹, respectively). A further increase in caprolactam level leads proportionally to extended lag time, slow specific growth rate and decreased optical density of the culture. The highest level of the caprolactam in the medium at which bacterial growth continued was 12.0 g/l. The study of the effect of pH and temperature on growth patterns of the strain BS38 showed that the optimum growth of the bacterium occurred at 28°C and pH 7.5 (See Fig. 1, B, C). It was found that the temperature mostly affected the specific growth rate of the culture (0.094, 0.052, and 0.038 h⁻¹ at a temperature of 28°C, 37°C, and 15°C, respectively) while the change in pH also caused an extension in lag time and a decrease in optical density (Fig. 1, B).

The paper contains 1 Figure and 16 References.

Key words: biodegradation; bioremediation; xenobiotic destruction; cultivation; caprolactam.

References

1. Ponamoreva ON. Methods for determination of caprolactam and oligomers in aqueous environments. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki = News of the Tula State University. Natural Sciences*. 2017;1:3-11. In Russian
2. Esikova TZ, Ponamoreva ON, Baskunov BP, Taran SA, Boronin AM. Transformation of low-molecular linear caprolactam oligomers by caprolactam-degrading bacteria. *J Chem Technol Biotechnol*. 2012;87:1284-1290. doi: [10.1002/jctb.3789](https://doi.org/10.1002/jctb.3789)
3. Baxi NN. Influence of ϵ -caprolactam on growth and physiology of environmental bacteria. *Annals of Microbiology*. 2013;63:1471-1476. doi: [10.1007/s13213-013-0610-4](https://doi.org/10.1007/s13213-013-0610-4)
4. Boronin AM, Kosheleva IA. The role of catabolic plasmids in biodegradation of petroleum hydrocarbons. In: *Current environmental issues and challenges*. Giacomo C and Roberto O, editors. Dordrecht: Springer Publ.; 2014. pp. 159-168.
5. Esikova TZ, Volkova OV, Taran SA, Boronin AM. Key role of the DCA genes in ϵ -caprolactam catabolism in *Pseudomonas* strains. *Microbiology*. 2015;84(5):726-729. doi: [10.1134/S0026261715050070](https://doi.org/10.1134/S0026261715050070)
6. Otzen M, Palacio C, Janssen DB. Characterization of the caprolactam degradation pathway in *Pseudomonas jessenii* using mass spectrometry-based proteomics. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2018;102(15):6699-6711. doi: [10.1007/s00253-018-9073-7](https://doi.org/10.1007/s00253-018-9073-7)
7. Esikova TZ, Akatova EV, Taran SA. Bacteria that degrade low-molecular linear epsilon-caprolactam oligomers. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2014;50(5):463-470. doi: [10.1134/S0003683814050044](https://doi.org/10.1134/S0003683814050044)
8. Wang CC, Lee CM. Isolation of the ϵ -caprolactam denitrifying bacteria from a wastewater treatment system manufactured with acrylonitrile-butadiene-styrene resin. *J Hazard Materials*. 2007;145:136-141. doi: [10.1016/j.jhazmat.2006.10.092](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.092)
9. Zudin DV, Kantere VM, Ugodchikov GA. Biotekhnologiya. Avtomatizatsiya biotekhnologicheskikh issledovaniy [Biotechnology. Automatization of biotechnological investigations]. Egorova NS, editor. Moscow: "Vysshaya shkola" Publ.; 1987. 112 p. In Russian
10. Solyanikova IP, Golovleva LA. Physiological and biochemical properties of actinobacteria as the basis of their high biodegradative activity (Review). *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2015;51(2):132-139. doi: [10.1134/S0003683815020180](https://doi.org/10.1134/S0003683815020180)
11. Estevinho BN, Lopes AR, Sousa V, Rocha F, Nunes OC. Microencapsulation of *Gulosibacter molinivorax* ON4^T cells by a spray-drying process using different biopolymers. *J Hazard Materials*. 2017;15(338):85-92. doi: [10.1016/j.jhazmat.2017.05.018](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.018)
12. Fortmann L, Rosenberg A. Fate of ϵ -caprolactam in the aquatic environment. *Chemosphere*. 1984;13:53-65. doi: [10.1016/0045-6535\(84\)90008-0](https://doi.org/10.1016/0045-6535(84)90008-0)
13. Boronin AM, Naumova RP, Grishchenkov VG, Ilijinskaya ON. Plasmids specifying ϵ -caprolactam degradation in *Pseudomonas* strains. *FEMS Microbiol Letters*. 1984;22:167-170. doi: [10.1111/j.1574-6968.1984.tb00719.x](https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1984.tb00719.x)
14. Sanuth HA, Yadav A, Fagade OE, Shouche Y. E-Caprolactam utilization by *Proteus* sp. and *Bordetella* sp. isolated from solid waste dumpsites in Lagos state, Nigeria, first report. *Indian J Microbiol*. 2013;53:221-226. doi: [10.1007/s12088-013-0356-5](https://doi.org/10.1007/s12088-013-0356-5)
15. Baxi NN, Shah AK. Biological treatment of the components of solid oligomeric waste from a nylon-6 production plant. *World J Microbiol Biotechnol*. 2000;16:835-840. doi: [10.1023/A:1008971216941](https://doi.org/10.1023/A:1008971216941)

16. Sokolov AB, Pechatnikov MG, Krizhanovskiy AS, Petrov GG. Kombinirovaniye khimicheskikh i biologicheskikh sposobov ochistki kaprolaktamisoderzhashchikh stokov [Combining chemical and biological methods for cleaning caprolactam-containing wastes]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal imeni DI Mendeleeva = Russian Journal of General Chemistry*. 2006;50(3):48-55. In Russian

Received 24 August 2018; Revised 05 December 2018;

Accepted 15 February 2019; Published 21 March 2019

Author info:

Esikova Tatiana Z, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Plasmid Biology, Federal Scientific Centre "Pushchinsky Scientific Centre of Biological Research, Russian Academy of Sciences", GK Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms, Pushchino, Russian Federation, 5 Nauki Ave., Pushchino 142290, Russian Federation.

E-mail: das3534@rambler.ru