

Научная статья

УДК 579.69

EDN RANYPZ

doi: 10.17072/1994-9952-2025-1-43-48



## Биодеградация линейных полиакриламидов амидазосодержащими бактериями

**Елена Михайловна Протасова**

Институт экологии и генетики микроорганизмов – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия,  
19mochalova96@mail.ru

**Аннотация.** Изучена способность бактериальных штаммов *Rhodococcus erythropolis* ИЛ БИО и *Alcaligenes faecalis* 2, обладающих амидазной активностью, использовать линейные полиакриламиды (ПАА) марки Праестол 650 BC, 2540 и 2300 D в качестве источника углеродного или азотного питания. Определено, что штаммы бактерий использовали данные ПАА в концентрации 0.1, 0.05 и 0.01% в качестве источника азота для роста биомассы. При этом наибольший рост бактерий наблюдали на среде с ПАА Праестол 2300 D в концентрации 0.1%. Следует отметить, что не во всех случаях рост амидазосодержащих бактерий коррелировал со снижением вязкости полимера. Отсутствие роста *A. faecalis* 2 наблюдали на среде с анионным полимером в концентрации 0.1% в качестве единственного ростового субстрата и в концентрации 0.01% в качестве углеродного питания. Неионогенный и катионный ПАА подвергались более эффективной микробной деградации, чем анионный.

**Ключевые слова:** амидазная активность, биодеградация, полиакриламиды

**Для цитирования:** Протасова Е. М. Биодеградация линейных полиакриламидов амидазосодержащими бактериями // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 1. С. 43–48. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-1-43-48>.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Биоразнообразие микроорганизмов в антропогенно-загрязненных экосистемах и функционально-генетические механизмы их адаптации к стрессовым условиям внешней среды», регистрационный номер НИОКТР 124020500028-4.

## MICROBIOLOGY

Original article

## Biodegradation of linear polyacrylamides by bacteria containing amidase

**Elena M. Protasova**

Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch RAS, Perm, Russia, 19mochalova96@mail.ru

**Abstract.** The ability of *Rhodococcus erythropolis* IL BIO and *Alcaligenes faecalis* 2 bacterial strains with amidase activity to use linear polyacrylamides (PAAs) Praestol 650 BC, 2540 and 2300 D as a source of carbon or nitrogen nutrition was studied. It was determined that bacterial strains used these PAAs at a concentration of 0.1, 0.05 and 0.01% as a nitrogen source for biomass growth. The greatest bacterial growth was observed on the medium with PAA Praestol 2300 D at a concentration of 0.1%. It should be noted that not in all cases did the growth of amidase-containing bacteria correlate with a decrease in polymer viscosity. No growth of *A. faecalis* 2 was observed on a medium with anionic polymer at a concentration of 0.1% as the only growth substrate and at a concentration of 0.01% as carbon nutrition. Nonionic and cationic PAAs were subjected to more effective microbial degradation than anionic.

**Keywords:** amidase activity, biodegradation, polyacrylamides

**For citation:** Protasova E. M. [Biodegradation of linear polyacrylamides by bacteria containing amidase]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 1 (2025): pp. 43-48. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-1-43-48>.

**Acknowledgments:** the work was performed within the framework of the state assignment on the topic "Biodiversity of microorganisms in anthropogenic-polluted ecosystems and functional and genetic mechanisms of their adaptation to stressful environmental conditions", R&D registration number 124020500028-4.

## Введение

Полиакриламиды (ПАА) представляют собой группу полимеров с высокой молекулярной массой на основе акриламида и его производных. ПАА широко применяются в различных областях промышленности и деятельности человека: водоочистке, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной, косметической, лакокрасочной и пищевой отраслях, сельском хозяйстве, добыче полезных ископаемых [Jiang et al., 2019; Uranta et al., 2019; Gaytán, Burelo, Loza-Tavera, 2021]. В большинстве случаев эти полимеры используют в качестве флокулянтов, которые способствуют эффективному разделению твердой и жидкой фаз в воде, содержащей взвешенные вещества [Wei et al., 2018; Akbar, Khan, Abid, 2022].

ПАА и его производные могут иметь различную молекулярную массу и плотность заряда при изменении параметров реакции полимеризации и/или относительных количеств используемых реагентов. Высокомолекулярные водорастворимые полимеры могут быть модифицированы для придания им неионогенных, анионных или катионных свойств для конкретных целей [Guezennec et al., 2015].

ПАА обычно считается нетоксичным веществом для растений и животных, однако присутствие мономеров в его составе или их высвобождение при деградации полимера могут являться причиной загрязнения окружающей среды, а также нанести вред здоровью человека и животных. В отличие от ПАА, акриламид представляет собой сравнительно небольшую молекулу, поэтому может легко проходить через биологические мембраны [Bedade, Singhal, 2018; Nyssölä, Ahlgren, 2019].

Таким образом, необходимо всесторонне изучать проблему эффективной утилизации этих полимеров. Разрушение ПАА и его производных может происходить путем механических, фотолитических, химических и биологических процессов [Gilbert et al., 2017]. Биodeградация является экономически эффективным и экологичным методом очистки окружающей среды от ксенобиотиков и органических поллютантов [Caulfield et al., 2003; Guezennec et al., 2015; Nyssölä, Ahlgren, 2019].

Для большинства микроорганизмов мономер ПАА является токсичным и может оказывать влияние на их рост и сульфгидрильные белки клеток. Тем не менее, многие штаммы способны расти в присутствии акриламида и частично или полностью разлагать его с помощью амидаз. Амидазы – широко распространенные в живой природе универсальные ферменты. Продукция амидаз обнаружена как у представителей бактерий родов *Arthrobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Acinetobacter*, *Brevibacterium*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Delftia*, *Enterobacter*, *Enterococcus*, *Escherichia*, *Helicobacter*, *Microbacterium*, *Moraxella*, *Nocardia*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Rhodopseudomonas*, *Stenotrophomonas*, так и среди грибов родов *Aspergillus*, *Candida*, *Kluyvera*, *Kluyveromyces* [Duda-Chodak et al., 2016; Joshi, Abed, 2017].

Полимеры с высокой молекулярной массой, такие как ПАА, не могут проходить через биологические мембраны, поэтому для их биodeградации требуется действие внеклеточных амидаз либо в аэробных, либо в анаэробных условиях, и далее они частично или полностью разлагаются множеством различных ферментов [Caulfield et al., 2003; Guezennec et al., 2015; Gaytán, Burelo, Loza-Tavera, 2021]. Только некоторые виды, принадлежащие к бактериальным родам *Enterobacter* sp., *Azomonas* sp., *Bacillus* sp., *Acinetobacter* sp., *Pseudomonas* sp. и *Clostridium* sp., способны использовать ПАА и его производные в качестве источника углерода и/или азота. Хотя амидазы участвуют в микробиологическом разложении ПАА, сведения о метаболических путях и ферментах, катализирующих деградацию углеродной основы полимера, в настоящее время не ясны [Duda-Chodak et al., 2016; Joshi, Abed, 2017; Максимова, Горшкова, Демаков, 2017].

Целью настоящей работы явилось изучение роста штаммов, обладающих амидазной активностью, на линейных катионных, анионных и неионогенных ПАА как источниках углерода и/или азота, и изменения вязкости этих полимеров.

## Материалы и методы исследования

### Бактериальные штаммы, условия культивирования и подготовка биомассы

Штаммы бактерий *Rhodococcus erythropolis* ИЛ БИО, выделенный ранее из почвы в присутствии попеременно-сшитого ПАА и поддерживаемый в лаборатории молекулярной биотехнологии «ИЭГМ УрО РАН» – филиала ПФИЦ УрО РАН [Максимова и др., 2022], и *Alcaligenes faecalis* 2, выделенный из активного ила очистных сооружений г. Перми с 3-цианопиридином как единственным источником углерода и азота [Демаков и др., 2015], культивировали в минимальной солевой среде следующего состава (г/л):  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 1.0;  $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$  – 3.7;  $\text{NaCl}$  – 0.5;  $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  – 0.5;  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  – 0.005;  $\text{CoCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$  – 0.01, pH  $7.2 \pm 0.2$ . В качестве источника углерода для родококка служила глюкоза в концентрации 0.1%, а источником азота – ацетонитрил в концентрации 0.05%. Для штамма алкалигенеса единственным источником углерода и азота был 0.1 М ацетамид.

Культивирование проводили в конических колбах объемом 1 000 мл в 400 мл минеральной среды в течение 7 сут. на роторной качалке при постоянном перемешивании со скоростью 120 об/мин при температуре 30°C.

Биомассу концентрировали центрифугированием в течение 20 мин. при 5 000 g на центрифуге 5804 R («Eppendorf», Германия), отмывали однократно от среды культивирования стерильным хлоридом натрия в концентрации 0.9%, центрифугировали повторно, разводили в стерильном растворе хлорида натрия.

Способность бактерий использовать ПАА в качестве источника углеродного, азотного питания или единственного ростового субстрата изучали в жидкой минимальной солевой среде. В качестве субстратов роста использовали линейные ПАА в концентрации 0.1%, 0.05% и 0.01%: ПАА Праестол 650 ВС, обладающий катионной активностью, ПАА Праестол 2540, обладающий анионной активностью, ПАА Праестол 2300 D, обладающий неионогенной активностью (получены из Института технической химии УрО РАН, Пермь). Клетки бактерий выращивали в среде с ПАА в трех вариантах: 1) в качестве единственного источника углерода и азота; 2) без дополнительного источника азота с глюкозой в концентрации 0.1% как источником углерода для *R. erythropolis* ИЛ БИО и ацетатом натрия в концентрации 1% для *A. faecalis* 2; 3) без дополнительного источника углерода с хлористым аммонием в концентрации 10 мМ как источником азота. Культивирование проводили в конических колбах объемом 100 мл в 30 мл среды в течение 10–14 сут. на роторной качалке при постоянном перемешивании со скоростью 110 об/мин при температуре 30°C. Рост бактерий оценивали по изменению оптической плотности клеточной суспензии, измеренной при длине волны 540 нм (ОП<sub>540</sub>) на фотоэлектроколориметре КФК-3 (АООТ «ЗОМЗ», Россия) в 0.5 см кюветках. Динамический коэффициент вязкости среды измеряли в течение 2 мин. при 100 г/см на ротационном вискозиметре ROTAVISC lo-vi Complete («IKA», Германия).

### Статистический анализ

Статистическая обработка результатов выполнена с помощью пакета программ Microsoft Excel 2019. Результаты представлены как среднее значение не менее чем трех независимых экспериментов ± стандартная ошибка среднего ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

### Результаты и их обсуждение

Результаты культивирования бактерий *R. erythropolis* ИЛ БИО и *A. faecalis* 2 в среде с линейными ПАА представлены в таблице. Выявлено, что *R. erythropolis* ИЛ БИО и *A. faecalis* 2 могут использовать ПАА катионный 650 ВС, анионный 2540 и неионогенный 2300 D марок Праестол в концентрации 0.1, 0.05 и 0.01% в качестве источника азота для роста биомассы. При этом наибольший рост бактерий наблюдали в среде с неионогенным полимером в концентрации 0.1%: ОП<sub>540</sub> в конце культивирования достигала 0.140 и 0.300 соответственно. В результате этого для *R. erythropolis* ИЛ БИО выявлено снижение динамического коэффициента вязкости среды с катионным и неионогенным в концентрации 0.05 и 0.01%, а также анионным в концентрации 0.1, 0.05 и 0.01% в качестве источника азота с дополнительным источником углерода – глюкозой. Для *A. faecalis* 2 – 650 ВС и 2300 D в концентрации 0.1 и 0.05%, а также 2540 в концентрации 0.1, 0.05 и 0.01% с дополнительным внесением ацетата натрия. Следует отметить, что не во всех случаях рост амидазосодержащих бактерий коррелировал со снижением вязкости полимера. Возможно, это связано с отщеплением аминокетильных групп, не затрагивающим углеродный остов молекулы. Однако в естественных условиях на полимер воздействует комплекс физико-химических факторов (ультрафиолетовое излучение, изменения pH среды и сезонные колебания температур), что вместе с биохимической деятельностью микроорганизмов может привести к деструкции полимера.

**Рост бактерий *R. erythropolis* ИЛ БИО и *A. faecalis* 2 в среде с линейными ПАА  
[Growth of *R. erythropolis* IL BIO and *A. faecalis* 2 bacteria on a medium with linear PAA]**

ПАА	Дополнительный источник С или N	В начале культивирования	В конце культивирования	
		Динамический коэффициент вязкости, мПа·с	ОП <sub>540</sub>	Динамический коэффициент вязкости, мПа·с
<i>Rhodococcus erythropolis</i> ИЛ БИО				
Катионный, 0.1%	N	6.5	Слабый рост, хлопья	6.9
Катионный, 0.1%	C	6.4	0.125	6.97
Катионный, 0.1%	–	6.84	Слабый рост, хлопья	7.02
Катионный, 0.05%	N	5.7	Слабый рост, хлопья	5.65
Катионный, 0.05%	C	5.6	0.110	5.38
Катионный, 0.05%	–	5.48	Слабый рост, хлопья	5.46
Катионный, 0.01%	N	3.8	Слабый рост, хлопья	4.02
Катионный, 0.01%	C	4.02	0.070	3.96
Катионный, 0.01%	–	3.9	Слабый рост, хлопья	3.9

ПАА	Дополнительный источник С или N	В начале культивирования	В конце культивирования	
		Динамический коэффициент вязкости, мПа•с	ОП <sub>540</sub>	Динамический коэффициент вязкости, мПа•с
Анионный, 0.1%	N	18.6	Слабый рост, хлопья	18.0
Анионный, 0.1%	C	18.5	0.100	18.1
Анионный, 0.1%	–	22.0	Слабый рост, хлопья	18.9
Анионный, 0.05%	N	7.68	Слабый рост, хлопья	7.32
Анионный, 0.05%	C	7.4	0.030	6.9
Анионный, 0.05%	–	7.7	0.010	7.63
Анионный, 0.01%	N	4.3	Слабый рост, хлопья	4.37
Анионный, 0.01%	C	4.5	0.015	4.42
Анионный, 0.01%	–	4.62	Слабый рост, хлопья	4.53
Неионогенный, 0.1%	N	5.7	Слабый рост, хлопья	5.93
Неионогенный, 0.1%	C	5.64	0.140	5.77
Неионогенный, 0.1%	–	5.6	Слабый рост, хлопья	5.89
Неионогенный, 0.05%	N	4.74	Слабый рост, хлопья	4.64
Неионогенный, 0.05%	C	4.8	0.092	4.5
Неионогенный, 0.05%	–	4.86	0.010	4.7
Неионогенный, 0.01%	N	3.84	Слабый рост	3.85
Неионогенный, 0.01%	C	3.78	0.040	3.66
Неионогенный, 0.01%	–	3.8	Слабый рост	3.85
<i>Alcaligenes faecalis 2</i>				
Катионный, 0.1%	N	6.42	Слабый рост, хлопья	6.44
Катионный, 0.1%	C	6.36	0.140	5.94
Катионный, 0.1%	–	6.72	Слабый рост, хлопья	6.7
Катионный, 0.05%	N	5.2	Слабый рост, хлопья	4.95
Катионный, 0.05%	C	5.1	0.060	4.7
Катионный, 0.05%	–	5.15	Слабый рост, хлопья	4.8
Катионный, 0.01%	N	3.63	Слабый рост, хлопья	3.5
Катионный, 0.01%	C	3.85	Слабый рост, хлопья	3.75
Катионный, 0,01%	–	3.9	Слабый рост, хлопья	3.52
Анионный, 0.1%	N	18.7	Слабый рост	19.4
Анионный, 0.1%	C	18.5	0.085	18.3
Анионный, 0.1%	–	22.0	0	21.0
Анионный, 0.05%	N	7.68	0.011	7.48
Анионный, 0.05%	C	7.4	0.060	6.36
Анионный, 0.05%	–	7.62	0.025	6.74
Анионный, 0.01%	N	4.3	0	4.33
Анионный, 0.01%	C	4.44	Слабый рост	4.2
Анионный, 0.01%	–	4.6	Слабый рост	4.4
Неионогенный, 0.1%	N	5.6	Слабый рост, хлопья	5.63
Неионогенный, 0.1%	C	5.4	0.300	4.73
Неионогенный, 0.1%	–	5.6	Слабый рост, хлопья	5.9
Неионогенный, 0.05%	N	4.8	Слабый рост, хлопья	4.9
Неионогенный, 0.05%	C	4.6	0.100	4.25
Неионогенный, 0.05%	–	4.86	Слабый рост, хлопья	4.9
Неионогенный, 0.01%	N	3.84	Слабый рост, хлопья	3.8
Неионогенный, 0.01%	C	3.72	0.025	3.8
Неионогенный, 0.01%	–	3.8	Слабый рост, хлопья	3.9

Отмечался слабый рост бактерий и образование небольших хлопьев в среде с данными полимерами как источниками углерода с введением в среду дополнительных источников азота, а также как единственными источниками углерода и азота.

Отсутствие роста *A. faecalis 2* наблюдали в среде с анионным полимером в концентрации 0.1% в качестве единственного ростового субстрата и в концентрации 0.01% в качестве углеродного питания.

Таким образом, нами было показано, что неионогенный и катионный ПАА подвержены более эффективной микробной деградации, чем анионный. По-видимому, это связано с отсутствием электростатического отталкивания между отрицательно заряженной клеточной стенкой и молекулой полимера.

### Заключение

В связи с широким применением акриловых полимеров в качестве флокулянтов для очистки сточных вод поиск микроорганизмов, которые могли бы частично или полностью разлагать ПАА и его производные, является непростой задачей из-за особенностей строения полимеров, а также возможной токсичности акриламида в их составе.

Изученные нами бактериальные штаммы *R. erythropolis* ИЛ БИО и *A. faecalis* 2, обладающие амидазной активностью, могут деградировать данные ПАА, используя их в качестве субстрата для роста, например, в качестве источника азота с дополнительным источником углерода. При этом эффективность микробной деградации ПАА зависит от его заряда. В перспективе данные штаммы могут быть применены для утилизации избытков отработанного полимера.

### Список источников

1. Демаков В.А. и др. Бактерии активного ила биологических очистных сооружений, трансформирующие цианопиридины и амиды пиридинкарбоновых кислот // Микробиология. 2015. Т. 84, № 3. С. 369–378. DOI: 10.7868/S0026365615030039 EDN: TQQVBB
2. Максимова Ю.Г., Горшкова А.А., Демаков В.А. Биодegradация полиакриламидов почвенной микрофлорой и штаммами амидазосодержащих бактерий // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2017. Вып. 2. С. 200–204. EDN: ZCMLLX
3. Максимова Ю.Г. и др. Влияние немодифицированных многостенных углеродных нанотрубок на формирование и разрушение бактериальных биопленок // Микробиология. 2022. Т. 91, № 4. С. 507–516. DOI: 10.31857/S0026365621100694 EDN: PXWGDO
4. Akbar M., Khan M.F.S., Abid M. Novel insight into the degradation of polyacrylamide by thermophilic anaerobic digestion // Biochem. Engin. J. 2022. Vol. 189. Art. 108716. DOI: 10.1016/j.bej.2022.108716 EDN: MADWMY
5. Bedade D.K., Singhal R.S. Biodegradation of acrylamide by a novel isolate, *Cupriavidus oxalaticus* IC-TDB921: Identification and characterization of the acrylamidase produced // Bioresource Technol. 2018. Vol. 261. P. 122–132. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.04.012 EDN: VFABUZ
6. Caulfield M.J. et al. Degradation on polyacrylamides. Part I. Linear polyacrylamide // Polymer. 2003. Vol. 44, № 5. P. 1331–1337. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00003-X EDN: BDQUJZ
7. Duda-Chodak A. et al. A review of the interactions between acrylamide, microorganisms and food components // Food Funct. 2016. Vol. 7, № 3. P. 1282–1295. DOI: 10.1039/c5fo01294e
8. Gaytán I., Burelo M., Loza-Tavera H. Current status on the biodegradability of acrylic polymers: microorganisms, enzymes and metabolic pathways involved // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2021. Vol. 105. P. 991–1006. DOI: 10.1007/s00253-020-11073-1 EDN: ZDTKJJ
9. Gilbert W.J.R. et al. Enzymatic degradation of polyacrylamide in aqueous solution with peroxidase and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> // J. Appl. Polym. Sci. 2017. Vol. 134, № 10. Art. 44560. DOI: 10.1002/app.44560 EDN: YWTRCP
10. Guezennec A.G. et al. Transfer and degradation of polyacrylamide based flocculants in hydrosystems: a review components // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2015. Vol. 22. P. 6390–6406. DOI: 10.1007/s11356-014-3556-6 EDN: VEXGHX
11. Jiang C. et al. Neighboring group effect on the thermal degradation of polyacrylamide and its derivatives // J. of Polymer Engineering. 2019. Vol. 39, № 3. P. 239–247. DOI: 10.1515/polyeng-2018-0274 EDN: NNAESR
12. Joshi S.J., Abed R.M.M. Biodegradation of polyacrylamide and its derivatives // Environ. Process. 2017. Vol. 4. P. 463–476. DOI: 10.1007/s40710-017-0224-0 EDN: YENXQQ
13. Nyssölä A., Ahlgren J. Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate // Inter. Biodeterioration and Biodegradation. 2019. Vol. 139. P. 24–33. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.02.005
14. Uranta K.G. et al. Application of polymer integration technique for enhancing polyacrylamide (PAM) performance in high temperature and high salinity reservoirs // Heliyon. 2019. Vol. 5, № 7. Art. e02113. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02113
15. Wei H. et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review // Water Research. 2018. Vol. 143. P. 608–631. DOI: 10.1016/j.watres.2018.07.029 EDN: YKRFRJ

### References

1. Demakov V.A., Vasil'ev D.M., Pavlova Y.A., Ovechkin G.V., Maksimov A.Y., Maksimova Y.G. [Activated sludge bacteria transforming cyanopyridines and amides of pyridinecarboxylic acids]. *Mikrobiologija*. V. 84, No. 3 (2015): pp. 369-378. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0026365615030039.

2. Maksimova Yu.G., Gorshkova A.A., Demakov V.A. [Polyacrylamide biodegradation by soil microflora and bacteria containing amidase]. *Vestnik Permskogo universiteta. Biologija*. Iss. 2 (2017): pp. 200-204. (In Russ.).
3. Maksimova Yu.G., Bykova Ya.E., Zorina A.S., Nikulin S.M., Maksimov A.Yu. [Effect of pristine multi-walled carbon nanotubes on formation and degradation of bacterial biofilms]. *Mikrobiologija*. V. 91, No. 4 (2022): pp. 507-516. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0026365621100694.
4. Akbar M., Khan M.F.S., Abid M. Novel insight into the degradation of polyacrylamide by thermophilic anaerobic digestion. *Biochem. Engin. J.* V. 189 (2022): Article 108716. DOI: 10.1016/j.bej.2022.108716.
5. Bedade D.K., Singhal R.S. Biodegradation of acrylamide by a novel isolate, *Cupriavidus oxalaticus* IC-TDB921: Identification and characterization of the acrylamidase produced. *Bioresource Technol.* V. 261 (2018): pp. 122-132. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.04.012.
6. Caulfield M.J., Hao X., Qiao G.G., Solomon D.H. Degradation on polyacrylamides. Part I. Linear polyacrylamide. *Polymer*. V. 44, No. 5 (2003): pp. 1331-1337. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00003-X.
7. Duda-Chodak A., Wajda Ł., Tarko T., Sroka P., Satora P. A review of the interactions between acrylamide, microorganisms and food components. *Food Funct.* V. 7, No. 3 (2016): pp. 1282-1295. DOI: 10.1039/c5fo01294e.
8. Gaytán I., Burelo M., Loza-Tavera H. Current status on the biodegradability of acrylic polymers: microorganisms, enzymes and metabolic pathways involved. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* V. 105 (2021): pp. 991-1006. DOI: 10.1007/s00253-020-11073-1.
9. Gilbert W.J R., Johnson S.J., Tsau J.-S., Liang J.-T., Scurto A.M. Enzymatic degradation of polyacrylamide in aqueous solution with peroxidase and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *J. Appl. Polym. Sci.* V. 134, No. 10 (2017): Art. 44560. DOI: 10.1002/app.44560.
10. Guezennec A.G., Michel C., Bru K., Touzé S., Desroche N., Mnif I., Motelica-Heino M. Transfer and degradation of polyacrylamide based flocculants in hydrosystems: a review components. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* V. 22, No. 9 (2015): pp. 6390-6406. DOI: 10.1007/s11356-014-3556-6.
11. Jiang C., Xia X., Kang S., Dong H., Sakinejad P., Ma Q., Tang Y. Neighboring group effect on the thermal degradation of polyacrylamide and its derivatives. *J. of Polymer Engineering*. V. 39, No. 3 (2019): pp. 239-247. DOI: 10.1515/polyeng-2018-0274.
12. Joshi S.J., Abed R.M.M. Biodegradation of polyacrylamide and its derivatives. *Environ. Process.* V. 4 (2017): pp. 463-476. DOI: 10.1007/s40710-017-0224-0.
13. Nyyssölä A., Ahlgren J. Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate. *Inter. Biodeterioration and Biodegradation*. V. 139 (2019): pp. 24-33. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.02.005.
14. Uranta K.G., Rezaei Gomari S., Russell P., Hamad F. Application of polymer integration technique for enhancing polyacrylamide (PAM) performance in high temperature and high salinity reservoirs. *Heliyon*. V. 5, No. 7 (2019): Art. e02113. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02113.
15. Wei H., Gao B., Ren J., Li A., Yang H. Coagulation /flocculation in dewatering of sludge: a review. *Water Research*. 2018. V. 143 (2018): pp. 608-631. DOI: 10.1016/j.watres.2018.07.029.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 04.03.2025.

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 04.03.2025.

#### **Информация об авторе**

Е. М. Протасова – инженер лаборатории молекулярной биотехнологии, выпускник аспирантуры по направлению подготовки 06.06.01 Биологические науки.

#### **Information about the author**

E. M. Protasova – engineer of the laboratory of molecular biotechnology, graduate of postgraduate studies in the field of training 06.06.01 Biological sciences.