

УДК 579:873:579.222.2

ГАЛОТОЛЕРАНТНЫЕ БАКТЕРИИ РОДА *Glutamicibacter* – ДЕСТРУКТОРЫ ТЕРЕФТАЛЕВОЙ КИСЛОТЫ

© 2022 г. О. В. Ястребова¹, *, А. А. Малышева², Е. Г. Плотникова^{1, 2}

¹Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, 614081 Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, 614068 Россия

*e-mail: olyastr@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 14.04.2022 г.

Принята к публикации 26.04.2022 г.

Терефталевая кислота (ТФК), изомер *орто*-фталевой кислоты, широко используется в химической промышленности для получения искусственных волокон и пластмасс, в том числе полиэтилентерефталата, и является распространенным загрязнителем окружающей среды. Изучена способность двух штаммов *Glutamicibacter* spp. PB8-1 (=ВКМ Ас-2934D) и BO25 (=ВКМ Ас2935D), выделенных из района солеразработок (Пермский край, Россия), к росту на ТФК как единственном источнике углерода и энергии. Штаммы PB8-1 и BO25 способны утилизировать высокие концентрации ТФК (30 г/л), что для бактерий-деструкторов ТФК показано впервые. Штаммы PB8-1 и BO25 являются галотолерантными бактериями: растут в среде как без NaCl, так и при содержании NaCl до 90 г/л в богатой среде и до 60 г/л в минеральной среде с ТФК. Бактерии, способные к деструкции ТФК в условиях засоления, ранее описаны не были. Рост штамма BO25 на ТФК сопровождался накоплением и последующим разложением протокатеховой кислоты (ПКК), что позволило предположить метаболизм ТФК через ПКК, описанный ранее для бактерий разных таксонов, в том числе актинобактерий. Таким образом, деструкторы ТФК *Glutamicibacter* spp. PB8-1 и BO25 являются перспективными для разработки методов биоремедиации засоленных почв и сточных вод, загрязненных ТФК.

Ключевые слова: аэробные бактерии, *Glutamicibacter*, терефталевая кислота, деструкция, хлорид натрия

DOI: 10.31857/S0555109922050166

Фталаты – соли и эфиры *орто*-фталевой кислоты, простейшей из двухосновных ароматических карбоновых кислот, которая является изомером терефталевой и изофталевой кислот. Фталаты широко применяются в промышленности в качестве пластификаторов при производстве пластмасс и большинства видов резины. Эфиры фталевой кислоты (дибутилфталат, диметилфталат, диэтилфталат) используются для пластификации поливинилхлорида (ПВХ), при синтезе полиэфирных волокон, полиэтилена, а также в производстве строительных и смазочных материалов, лаков, косметики [1–3]. Терефталевая кислота (ТФК) – изомер фталевой кислоты с *пара*-расположением карбоксильных групп, широко применяется для получения насыщенных полиэфиров, химических волокон, пластмасс, красителей. ТФК является основным исходным соединением для получения полиэтилентерефталата (ПЭТ), который составляет 90% от общего производимого количества насыщенных полиэфиров и используется

в производстве искусственного волокна, пластиковых бутылок, пластмассы. Мировое годовое производство полиэтилентерефталата превысило 30 миллионов тонн, при этом потребность в ПЭТ постоянно растет [4]. Наряду с 2-этилгексанолом, ТФК является сырьем для производства диоктилтерефталата (ДОТФ) – ключевого компонента в производстве обоев, линолеума, напольных и кровельных материалов и другой продукции строительной отрасли [5].

В связи с широким применением в промышленном производстве, фталаты (в том числе, ТФК) являются повсеместными загрязнителями окружающей среды и обнаруживаются в настоящее время в различных экосистемах, в том числе в почве, морской воде, донных отложениях [6–8]. При производстве 1 т ТФК обычно образуется 3–10 т сточных вод, содержащих высокие концентрации этого соединения. В Китае производственные мощности по производству ТФК достигли 12 млн т/г, при этом объем сточных вод со-

ставлял около 30 миллионов т/г с концентрацией выбросов ТФК более 1000 мг/л [9, 10]. Известно, что терефталевая кислота оказывает неблагоприятное воздействие на клетки человека и животных, обладает гепатотоксичными и канцерогенными свойствами, в связи с чем, необходима утилизация этого широко распространенного поллютанта [6, 11].

К настоящему времени разработаны физические и химические методы разложения ТФК, однако данные методы являются сложными и дорогостоящими [12, 13]. Микробная деградация ТФК является альтернативным экологически безопасным и экономичным методом [10, 14]. Из литературы известна способность бактерий различных филогенетических групп к разложению ТФК. Так, изучена способность к росту и деструкции ТФК у грамотрицательных бактерий рода *Comamonas*, *Pseudomonas* [14, 15]. Среди грамположительных бактерий, утилизирующих ТФК, описаны несколько штаммов родов *Rhodococcus*, *Arthrobacter* [10, 16, 17]. В то же время, бактериальная деструкция ТФК изучена менее детально, чем биodeградация орто-фталевой кислоты [3, 18]. Известно, что разложение ТФК начинается с дигидроксирования ароматического кольца с образованием *цис*-1,2-дигидрокси-1,2-дигидротерефталата, при трансформации которого образуется протокатеховая кислота (ПКК) — ключевой метаболит утилизации изомеров и сложных эфиров орто-фталевой кислоты [3, 15, 16]. К настоящему времени в литературе не найдено статей, посвященных деструкции ТФК актинобактериями рода *Glutamicibacter*.

Цель настоящей работы — характеристика двух бактерий рода *Glutamicibacter*, выделенных из района солеразработок, способных к деструкции терефталевой кислоты.

МЕТОДИКА

Объекты исследования. В работе использованы бактериальные штаммы ВО25 и РВ8-1 из коллекции лаборатории микробиологии техногенных экосистем “ИЭГМ УрО РАН”, которые были идентифицированы как представители рода *Glutamicibacter* [19].

Штаммы ВО25 (=ВКМ Ас-2935D), РВ8-1 (ВКМ Ас-2934D) выделены из образцов, отобранных на территории промышленных солеразработок (г. Березники, Россия). Штамм ВО25 выделен из образца техногенно-минеральных образований калийного производства БКПРУ-1 методом прямого высева на агаризованную богатую среду Раймонда (БСР) [19] с добавлением 50 г/л NaCl. Штамм РВ8-1 выделен из образца ризосферной почвы, отобранного вблизи солеотвала БКПРУ-3 методом накопительного культивирования в минеральной среде Раймонда с орто-фта-

левой кислотой (1 г/л) в качестве субстрата и добавлением 30 г/л NaCl [19].

Среды и условия культивирования. Для выращивания бактерий использовали минеральную среду Раймонда (МСР) следующего состава (г/л): NH_4NO_3 — 2.0, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0.2, K_2HPO_4 — 2.0, Na_2HPO_4 — 3.0, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 0.01, Na_2CO_3 — 0.1, 2 мл/л 1%-ного раствора $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и 1 мл/л 1%-ного раствора $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [20]. В качестве субстратов использовали ТФК, орто-фталевую кислоту (ОФК), дибутилфталат (ДФБ), диметилфталат (ДМФ), протокатеховую кислоту (ПКК), фенантрен, бифенил, салицилат, бензоат и нафталин в концентрации 1.0 г/л. Характеристики роста штаммов изучали в жидкой среде Раймонда с добавлением NaCl в концентрации 30–100 г/л. Для приготовления богатой среды Раймонда (БСР) в минеральную среду Раймонда добавляли 5 г/л триптона и 2.5 г/л дрожжевого экстракта в качестве субстратов. Культивирование микроорганизмов в жидких средах проводили при 28°C на термостатируемой качалке при 100 об./мин. Для получения агаризованных сред добавляли агар-агар (“Helicon”, Россия) в концентрации 15 г/л. Культивирование микроорганизмов осуществляли в термостате при 28°C.

Характеристики роста бактерий. Рост бактерий при разных концентрациях хлорида натрия изучали в периодической культуре в жидкой среде МСР с ТФК (1.0 г/л) в присутствии 30, 60, 70 г/л NaCl и без соли в среде. В качестве инокулята использовали культуры в экспоненциальной фазе роста, выращенные на МСР, без добавления NaCl, с ТФК в качестве субстрата. Рост бактерий при разных концентрациях ТФК оценивали в жидкой минеральной среде К1 [22], в которую вносили субстрат в концентрациях 1, 10, 20, 30, 40 г/л. В качестве инокулята использовали культуры в экспоненциальной фазе роста, выращенные на среде К1 с ТФК (1 г/л) в качестве субстрата. Культуры бактерий выращивали в колбах Эрленмейера объемом 250 мл (объем среды — 100 мл) при 28°C, с аэрацией на термокачалке при 100 об/мин. Оптическую плотность (ОП_{600}) культуральной жидкости определяли на спектрофотометре UV Visible BioSpec-mini (“Shimadzu”, Япония) при длине волн 600 нм в кювете с длиной оптического пути 1 см. Расчет удельной скорости роста (μ , ч^{-1}) проводили по стандартной формуле: $\mu = (\ln B_2 - \ln B_1) / (t_2 - t_1)$, где B_1 и B_2 — оптические плотности культуры в моменты времени t_1 и t_2 , соответственно [21].

При оценке роста бактерий при разных pH использовали среду БСР с 30 г/л NaCl, штаммы культивировали на агаризованной среде при pH 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0. Рост оценивали по наличию бактериальных колоний на седьмой день культивирования [21].

Таблица 1. Рост штаммов рода *Glutamicibacter* на моно(поли)ароматических соединениях*

Штамм	Субстрат									
	ОФК	ТФК	ДФФ	ДМФ	ПКК	Фен	Биф	Сал	Бен	Наф
BO25	++	++	±	±	++	—	+	+	+	±
PB8-1	++	++	+	±	++	—	—	+	+	+

Примечание. “++” — $OP_{600} \geq 0.5$; “+” — $OP_{600} = 0.35-0.5$; “±” — $OP_{600} = 0.2-0.35$; “—” — отсутствие роста. *ОФК — орто-фталевая кислота, ТФК — терефталевая кислота, ДБФ — дибутилфталат, ДМФ — диметилфталат, ПКК — протокатеховая кислота, Фен — фенантрен, Биф — бифенил, Сал — салицилат, Бен — бензоат, Наф — нафталин.

Потребление ТФК и определение ПКК. ТФК и ПКК в среде для выращивания определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с использованием хроматографа LC-20AD Prominence (“Shimadzu”, Япония) с колонкой (C-18 150 × 4.6 мм; “Shima-Aldrich”, США) и УФ-детектором SPD-20A (при 205 нм) в системе ацетонитрил–0.1%-ная H_3PO_4 (70 : 30). В качестве подвижной фазы использовали 80%-ный раствор ацетонитрила при скорости потока 1.0 мл/мин и температуре 40°C. Идентификацию проводили при сравнении времени выхода пиков экстрактов со стандартными растворами ТФК и ПКК в концентрациях 50 и 100 мг/л, время удерживания (t_R) ТФК и ПКК составляло 5.1 мин и 4.8 мин, соответственно. Количественное содержание рассчитывали с помощью пакета программ “LCsolution” (“Shimadzu”, Япония). Расчет удельной скорости утилизации (μ , сут^{−1}) проводили по стандартной формуле: $\mu = (\ln C_1 - \ln C_2)/(t_2 - t_1)$, где C_1 , C_2 — концентрация субстрата в начальный и конечный момент времени t_1 и t_2 , соответственно [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика штаммов. На основании морфо-физиологических и генетических (анализ гена 16S рРНК) характеристик штаммы BO25 и PB8-1 были идентифицированы как представители рода *Glutamicibacter* (семейство *Micrococcaceae*). Показано, что штамм BO25 филогенетически наиболее близок типовому штамму вида *G. halophytocola*, а штамм PB8-1 — типовому штамму вида *G. arilaitensis* [19].

Штаммы BO25 и PB8-1 были выделены из образцов шлама и ризосферной почвы, отобранных на территории добычи и переработки калийно-магниевого сырья Верхнекамского месторождения (Россия). Ранее было показано, что образцы из района солеразработок характеризовались как повышенным содержанием соли, так и присутствием стойких органических загрязнителей, в том числе фталатов [23, 24]. *Glutamicibacter* spp. BO25, PB8-1 обладали способностью к росту на моно- и полиароматических углеводородах при культивировании в присутствии 30 г/л NaCl. Штамм BO25

показал умеренный рост на бензоате, ОФК, ДБФ, ДМФ, а также слабый рост на нафталине. Штамм PB8-1 способен к росту на бензоате, ОФК, ДБФ, нафталине и слабому росту на ДМФ (табл. 1). В литературе описаны штаммы рода *Glutamicibacter*, растущие на фталатах и моноароматических углеводородах в качестве субстратов. Так, штамм *G. nicotianae* ZM05 способен к утилизации ОФК и сложных эфиров фталевой кислоты: ДБФ, ДМФ, диэтилфталата (ДЭФ), ди-*n*-пропилфталата, а также ПКК [25]. Штамм *G. nicotianae* MSSRF-PD35 способен к деградации фенола и его производных, а также катехола [26].

Штаммы BO25 и PB8-1 хорошо росли при pH от 6.0 до 9.0 с оптимумом при 7.0. Аналогичные показатели pH были показаны ранее и для других видов рода *Glutamicibacter* [27].

Рост штаммов BO25 и PB8-1 в присутствии высоких концентраций соли. Установлено, что штаммы BO25 и PB8-1 способны к росту на агаризованной БСР как без добавления соли в среду культивирования, так и при содержании в среде до 90 г/л хлорида натрия. На агаризованной МСР с ТФК (1 г/л) в качестве единственного источника углерода и энергии штаммы росли при концентрации NaCl до 60 г/л в среде. Согласно полученным данным, штаммы BO25 и PB8-1 относятся к умеренно галотолерантным микроорганизмам по классификации Кашнера [28].

Изучено влияние различных концентраций NaCl на рост и потребление ТФК штаммами PB8-1 и BO25 в среде МСР с ТФК (1 г/л) в качестве субстрата (рис. 1, 2). Активный рост штаммов наблюдался в присутствии NaCl до 60 г/л в среде. Наибольшую плотность роста (OP_{600}) штаммов зафиксировали при культивировании без добавления NaCl. Высокие значения OP_{600} и скорости роста культур наблюдали также в присутствии 30 г/л NaCl. Повышение концентрации NaCl в среде до 60 г/л NaCl приводило к увеличению лаг-фазы роста и к снижению максимальных значений OP_{600} штаммов, однако удельная скорость роста снижалась незначительно (табл. 2). У штамма BO25 наблюдали как увеличение лаг-фазы, так и снижение максимального значения OP_{600} , по сравнению со штаммом PB8-1. При содержании в

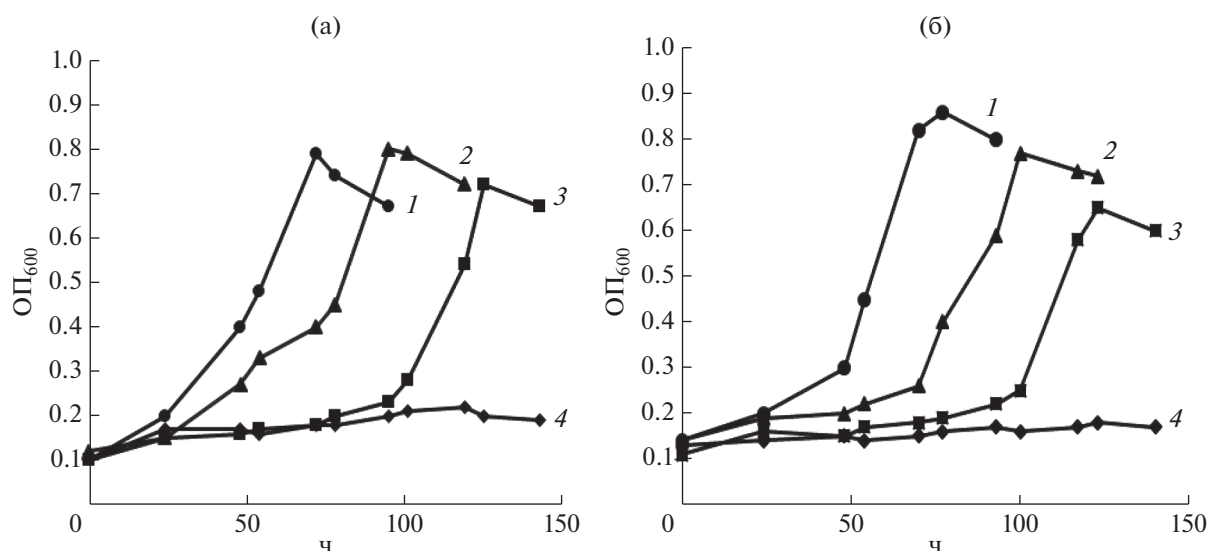


Рис. 1. Рост штаммов PB8-1 (а) и VO25 (б) на ТФК (1 г/л) при различных концентрациях NaCl (г/л): 1 – без NaCl; 2 – 30; 3 – 60; 4 – 70.

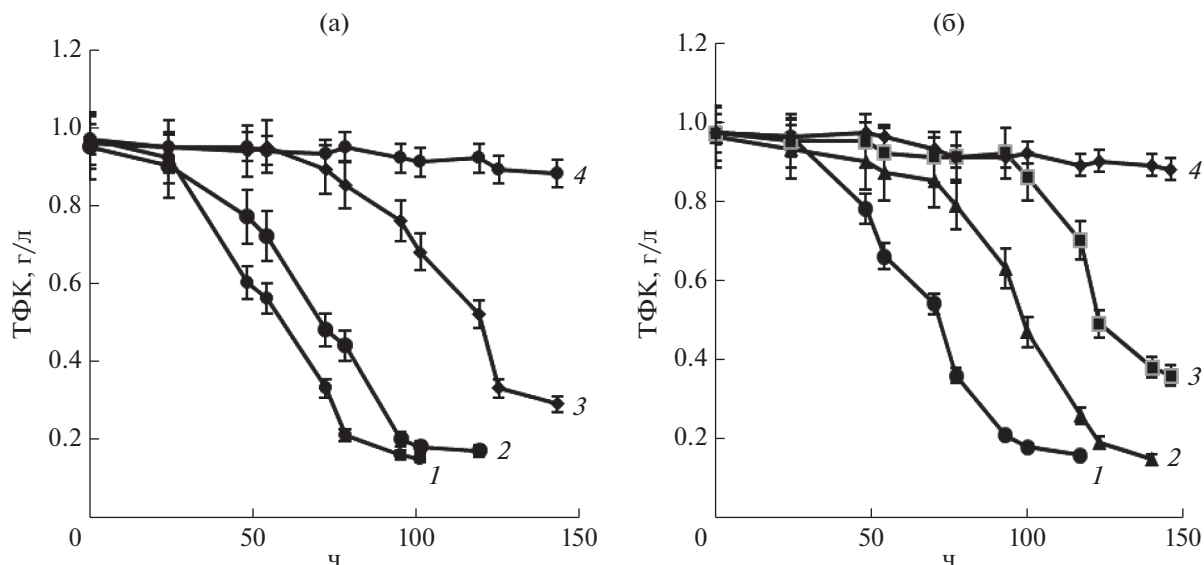


Рис. 2. Утилизация ТФК (1 г/л) штаммами PB8-1 (а) и VO25 (б) при различных концентрациях NaCl (г/л): 1 – без NaCl; 2 – 30; 3 – 60; 4 – 70.

среде 70 г/л NaCl рост штаммов на ТФК не наблюдали.

Отмечалась корреляция между показателями роста штаммов и снижением концентрации ТФК в среде культивирования. Показано, что деструкция терефталата штаммами PB8-1 и VO25 в среде без добавления соли и с добавлением 30 г/л NaCl была выше 84%. С повышением содержания NaCl в среде до 60 г/л отмечалось снижение уровня де-

струкции субстрата до 69.7 и 62.8% для штаммов PB8-1 и VO25 соответственно (табл. 2).

Известны бактерии рода *Glutamicibacter*, растущие на средах с высоким содержанием солей. Так, штаммы *G. halophytocola* KLBMP5180^T и *Glutamicibacter* sp. YD01, как показано авторами, были способны к росту на богатой среде в присутствии до 130 и 100 г/л NaCl соответственно [27, 29]. Однако штаммы рода *Glutamicibacter*,

Таблица 2. Параметры роста и утилизации ТФК при различных концентрациях хлорида натрия штаммами PB8-1, BO25 при выращивании в присутствии ТФК, ПКК

Параметр	ТФК						ПКК	
	PB8-1			BO25			PB8-1	BO25
	без NaCl	30 г/л	60 г/л	без NaCl	30 г/л	60 г/л	без NaCl	
Удельная скорость роста, ч ⁻¹	0.018 ± ± 0.002	0.020 ± ± 0.001	0.018 ± ± 0.003	0.021 ± ± 0.004	0.017 ± ± 0.003	0.016 ± ± 0.002	0.020 ± ± 0.002	0.030 ± ± 0.006
Максимальное значение ОП ₆₀₀	0.79	0.80	0.72	0.78	0.77	0.65	0.73	0.91
Лаг-фаза роста, ч	24	24	78	24	70	93	24	24
Утилизация ТФК, %	84.5 ± 0.2	85.2 ± 0.4	69.7 ± 0.3	83.5 ± 0.3	84.3 ± 0.2	62.8 ± 0.3	—	—
Удельная скорость потребления, сут ⁻¹	0.560	0.347	0.151	0.460	0.226	0.188	—	—

способные к разложению фталатов, в частности ТФК, в условиях повышенного засоления, ранее описаны не были.

Рост штаммов BO25 и PB8-1 на средах с высокими концентрациями ТФК. Установлено, что штаммы PB8-1 и BO25 при культивировании в среде K1 [22], не содержащей NaCl, способны использовать ТФК в качестве единственного источника углерода и энергии в концентрации до 30 г/л (рис. 3). При концентрации ТФК 1 г/л максимальные значения ОП₆₀₀ среды к 78-102 ч культивирования штаммов

PB8-1 и BO25 составляли 0.8 и 0.94 соответственно. Увеличение концентрации ТФК в среде у обоих штаммов приводило к увеличению длительности лаг-фазы, накоплению биомассы и снижению удельной скорости роста (табл. 3). При этом максимальные значения ОП₆₀₀ штаммов наблюдались при концентрации ТФК в среде культивирования 10 г/л и составляли 1.43 и 1.6 для штаммов PB8-1 и BO25 соответственно. При повышении концентрации ТФК в среде до 40 г/л роста исследуемых штаммов не наблюдали.

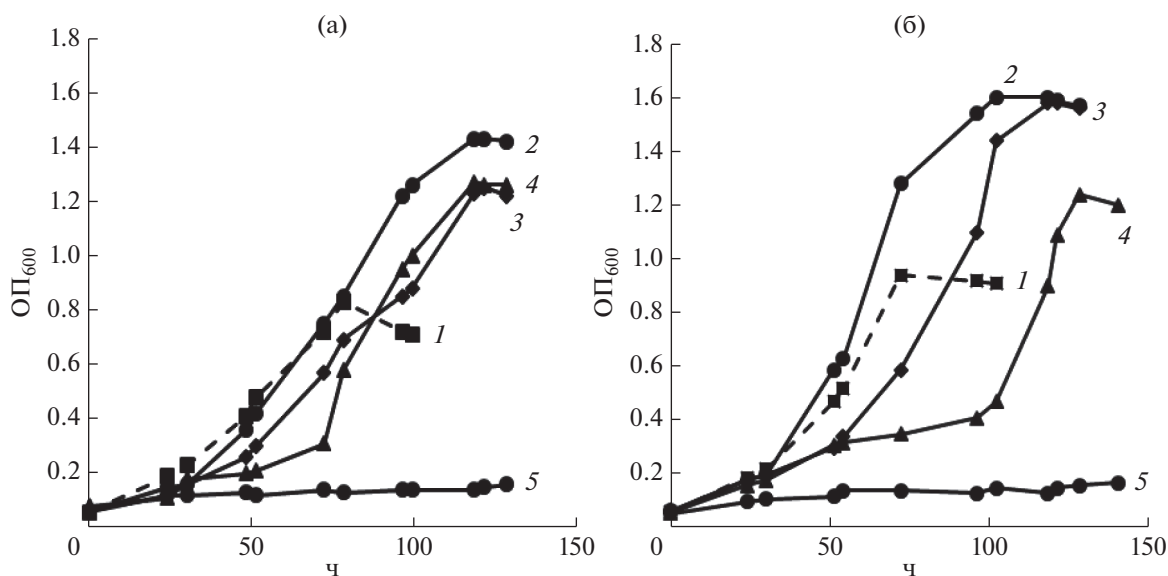
**Рис. 3.** Рост штаммов PB8-1 (а) и BO25 (б) на ТФК (г/л): 1 – 1; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40.

Таблица 3. Параметры роста и утилизации ТФК (1, 10, 20, 30 г/л) штаммами PB8-1, BO25

Показатель	PB8-1				BO25			
	1	10	20	30	1	10	20	30
Удельная скорость роста, ч ⁻¹	0.012 ± ± 0.003	0.017 ± ± 0.001	0.014 ± ± 0.002	0.020 ± ± 0.002	0.018 ± ± 0.003	0.030 ± ± 0.004	0.026 ± ± 0.003	0.028 ± ± 0.002
Максимальное значение ОП ₆₀₀	0.83	1.43	1.25	1.27	0.94	1.60	1.58	1.24
Лаг-фаза роста, ч	24	30	48	72	30	30	51	102
Утилизация ТФК, %	79.0 ± 0.3	67.0 ± 0.4	32.6 ± 0.3	21.0 ± 0.2	87.5 ± 0.5	78.0 ± 0.3	38.0 ± 0.1	19.3 ± 0.2
Удельная скорость утилизации, сут ⁻¹	0.373	0.270	0.086	0.054	0.420	0.360	0.119	0.044

Наиболее высокий уровень утилизации ТФК отмечали при выращивании штамма PB8-1 в среде K1 при концентрации субстрата 1.0 г/л – 79% за 99 ч, а штамма BO25 – 87.5% за 118 ч. Максимальная удельная скорость потребления ТФК у этих штаммов также наблюдалась при содержании ТФК в среде 1.0 г/л (табл. 3).

Как показано для представителей разных таксономических групп, терефталевая кислота в повышенных концентрациях может подавлять рост бактерий и способность к деградации этого соединения. Так, концентрация ТФК 10 г/л и выше подавляла способность клеток штамма *Arthrobacter* sp. 0574 разлагать ТФК [10], а у бактерий рода *Pseudomonas* концентрация, которая превышала 1 г/л уже ингибировала рост [14]. Описан штамм *Rhodococcus* sp. N2, утилизирующий 10 г/л ТФК за 5 сут [30]. Исследуемые нами штаммы *Glutamicibacter* spp. PB8-1 и BO25 были способны к эффективному росту на более высоких концентрациях до 30 г/л ТФК. Таким образом, исследуемые штаммы не только способны выдерживать критически высокие концентрации ТФК, но и использовать это соединение в качестве источника углерода и энергии, что представляет несомненный интерес для дальнейшего изучения.

Разложение ТФК штаммами PB8-1 и BO25. Известно, что деградация терефталевой кислоты аэробными бактериями осуществляется через стадию образования *цис*-1,2-дигидрокси-1,2-дигидротерефталата, который трансформируется до ПКК с последующим ее разложением до основных продуктов жизнедеятельности микробной клетки (рис. 4) [3, 16, 31]. Показана способность исследуемых штаммов BO25 и PB8-1 расти в МСР с 30 г/л NaCl на ПКК в качестве субстрата (рис. 5). Штамм BO25 имел более высокие показатели максимального значения ОП₆₀₀, удельной скорости роста на ПКК, чем штамм PB8-1 (табл. 2). Анализ продуктов утилизации ТФК в культуральной сре-

де при выращивании штамма BO25 на данном субстрате методом ВЭЖХ показал присутствие ПКК в концентрации 0.3 и 0.1 г/л через 48 и 70 ч культивирования соответственно. На основании присутствия метаболита в среде с ТФК и способности исследуемых штаммов к росту на ПКК (рис. 5) можно предположить, что деградация ТФК штамма *Glutamicibacter* sp. BO25 осуществлялась по пути образования ПКК с последующим ее разложением (рис. 4). Известно, что утилизация ПКК актинобактериями идет преимущественно по *орто*-пути [32]. В то же время, имеются данные о возможности деградации ПКК у штаммов семейства *Micrococcaceae* (родов *Arthrobacter*, *Pseudarthrobacter*) по *орто*- и/или *мета*-пути [18, 33]. Исследование метаболического пути деградации ТФК и ПКК штаммами *Glutamicibacter* spp. BO25 и PB8-1 будет продолжено.

Таким образом, впервые охарактеризованы галотолерантные деструкторы ТФК рода *Glutamicibacter*. Штаммы BO25 и PB8-1 способны к росту и эффективной деградации ТФК, в том числе при засолении среды (до 60 г/л NaCl) и высоких концентрациях этого соединения в среде культивирования (до 30 г/л). Подобные характеристики у бактериальных культур обнаружены впервые. Описанные бактериальные культуры являются перспективными для разработки эффективных биотехнологий очистки загрязненных/засоленных почв и промышленных стоков.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер государственной регистрации темы: АААА-А19-119112290008-4 и при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Пермского края в рамках научного проекта № 19-44-590011p_a.

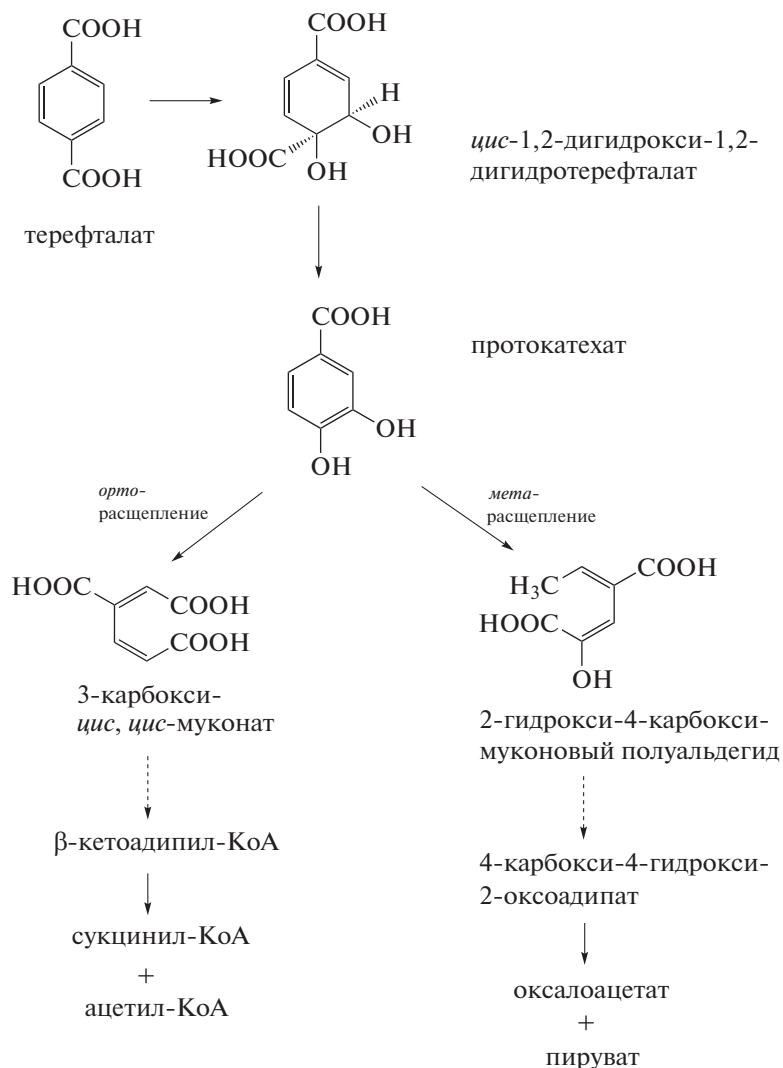


Рис. 4. Пути бактериальной деструкции терефталевой и протокатеховой кислот в аэробных условиях [16, 31].

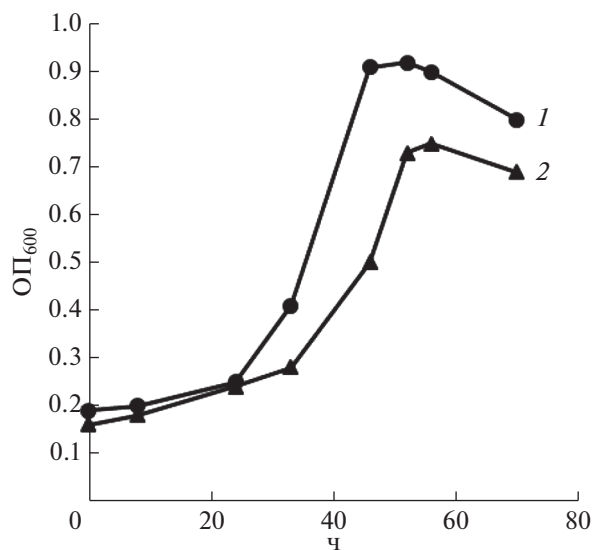


Рис. 5. Рост штаммов BO25 (1) и PB8-1 (2) на ПКК (1 г/л).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит результатов каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jin D.-C., Liang R.-X., Dai Q.-Y., Zhang R.-Y., Wu X.-L., Chao W.-L. // J. Microbiol. Biotechnol. 2010. V. 20. № 10. P. 1440–1445.
2. Keyser P., Pujar B.G., Eaton R.W., Ribbons D.W. // Environ. Health Perspect. 1976. V. 18. P. 159.
3. Liang D.W., Zhang T., Fang H. // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2008. V. 80. P. 183–198.
4. Delle Chiaie K.R., McMahon F.R., Williams E.J., Price M.J., Dove A.P. // Polym. Chem. 2020. V. 11. P. 1450–1453.

5. Медведев А.Н., Черезова Е.Н. // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 15. С. 44–46.
6. Przybylinka P.A., Wyszowski E. // Ecol. Chem. Engin. 2016. V. 23(2). P. 347–356.
7. Staples C.A., Parkerton T.F., Peterson D.R. // Chemosphere. 2000. V. 40. P. 885–891.
8. Gao D., Wen Z. // Sci. Total Environ. 2016. V. 541. P. 986–1001.
9. Zhang X., Wan Y., Cheng S., Sun S., Zhu C., Li W., Zhang X., Wang G., Lu J., Luo X. // J. Environ. Sci. (China). 2005. V. 17. № 5. P. 876–880.
10. Zhang Y.-M., Sun Y.-Q., Wang Z.-J., Zhang J. // South African J. Science. 2013. V. 109. № 7/8. Art. #0019. <https://doi.org/10.1590/sajs.2013/20120019>
11. Zhang Z., Ma L., Zhang X.X., Li W., Zhang Y., Wu B., Yang L., Cheng S. // J. Hazard. Mater. 2010. V. 181. P. 1121–1126.
12. Park T., Lim J., Lee Y., Kim S. // J. Supercrit. Fluids. 2013. V. 26 P. 201–213.
13. Shafaei A., Nikazar M., Arami M. // Desalination. 2010. V. 252. P. 8–16.
14. Wang Z.J., Teng L.H., Zhang J.F. // Afr. J. Biotechnol. 2011. V. 10. № 16. P. 3143–3148.
15. Kasai D., Kitajima M., Fukuda M., Masai E. // Appl. Environ. Microbiol. 2010. V. 76. № 18. P. 6047–6055.
16. Hara H., Eltis L.D., Davies J.E., Mohn W.W. // J. Bacteriol. 2007. V. 189. № 5. P. 1641–1647.
17. Choi K.Y., Kim D., Sul W.J., Chae J.C., Zylstra G.J., Kim Y.M., Kim E. // FEMS Microbiol. Letters. 2005. V. 252. P. 207–213.
18. Eaton R.W. // J. Bacteriol. 2001. V. 183. № 12. P. 3689–3703.
19. Ястребова О.В., Плотникова Е.Г. // Вестник Пермского Университета. Серия Биология. 2020. № 4. С. 321–333.
20. Raymond R.L. // Developments in Industrial Microbiol. 1961. V. 2. №1. P. 23–32.
21. Нептрсов А.И. Практикум по микробиологии. М.: Академия, 2005. 608 с.
22. Зайцев Г.М., Карасевич Ю.Н. // Микробиология. 1981. Т. 50. С. 35–40.
23. Бачурин Б.А., Одинцова Т.А. Стойкие органические загрязнители в отходах горного производства. Современные экологические проблемы Севера. Апатиты: Изд-во НЦ РАН. 2006. Т. 2. С. 7–9.
24. Корсакова Е. С., Шестакова Е. А., Хайрулина Е. А., Назаров А. В. // Российский иммунологический журнал. 2015. Т. 9(18). № 2(1). С. 591–593.
25. Wang X., Shen S., Wu H., Wang H., Wang L. // Microorganisms. 2021. V. 30. № 9(7). P. 1417–1428.
26. Purushothaman D., Jegan S., Anu D.A., Prabavathy V.R. // Front. Microbiol. 2020. Article 1573. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01573>
27. Feng W.-W., Wang T.-T., Bai J.-L., Ding P., Xing K., Jiang J.-H., Peng X. Q. // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2017. V. 67. P. 1120–1125.
28. Kushner D.J. Life in High Salt and Solute Concentrations: Halophilic Bacteria, in Microbial Life in Extreme Environments / Ed. D.J. Kushner. London: Academic press, 1978. P. 317–368.
29. Ji J., Yuan D., Jin C., Wang G., Li X. // Acta Physiologiae Plantarum. 2020. V. 42. № 42. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-3034-3>
30. Suwanawat N., Parakulsuksatid P., Nitayapat N., Sanpamongkolchai W. // Int. J. Environ. Science and Development. 2019. V. 10. № 1. P. 30–33.
31. Benjamin S., Pradeep S., Josh M.S., Kumar S., Masai E. // J. Hazardous Materials. 2015. V. 298. P. 58–72.
32. Bugg T.D., Ahmad M., Hardiman E.M., Singh R. // Curr. Opin. Biotechnol. 2011. V. 22. P. 394–400.
33. Tsagogiannis E., Vandera E., Primikyri A., Asimakoula S., Tzakos A.G., Gerothanassis I.P., Koukkou A.-I. // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. 9647. <https://doi.org/10.3390/ijms22179647>

Halotolerant Terephthalic Acid-Degrading Bacteria of the Genus *Glutamicibacter*

O. V. Yastrebova^{a, *}, A. A. Malysheva^b, and E. G. Plotnikova^{a, b}

^a Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, 614081 Russia

^b Perm State University, Perm, 614068 Russia

*e-mail: olyastr@mail.ru

Terephthalic acid (TPA), an isomer of *ortho*-phthalic acid, is widely used industrial chemical, used in the manufacture of artificial fibers and plastics, including polyethylene terephthalate, and therefore is a widespread environmental pollutant. The ability of strains *Glutamicibacter* spp. PB8-1 and BO25 isolated from the salt mining area (Perm Krai, Russia) to growth on terephthalic acid as the only source of carbon and energy was studied. *Glutamicibacter* spp. PB8-1 and BO25 are able to utilize high concentrations of TPA (30 g/L), which is shown for the first time for TPA-degrading bacteria. Strains PB8-1 and BO25 are halotolerant bacteria: they grow without NaCl in the medium and at NaCl concentrations up to 90 g/L (in a rich medium), up to 60 g/L (in a mineral medium with TPA). Bacteria capable of degrading TPA under saline conditions have not been previously described. The growth of strain BO25 on TPA was accompanied by the accumulation and subsequent degradation of protocatechuic acid (PCA). This suggests that TPA metabolism in the strain proceeds through the formation of PCA, that was described earlier for bacteria of different taxa, including actinobacteria. Thus, TPA-degrading strains *Glutamicibacter* spp. PB8-1 and BO25 are of interest for further research and are promising for the development of bioremediation methods for saline soils and wastewater contaminated with TPA.

Keywords: aerobic bacteria, *Glutamicibacter*, terephthalic acid, degradation, sodium chloride