



Динамика концентрации нафталина в водной среде в присутствии *Bacillus megaterium*

С.А. Коваленко*, А.Б. Купчинский*, Д.И. Стом*****✉

*Байкальский музей СО РАН, Листвянка, Российская Федерация

**Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

***Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

****Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Изучили экспериментально динамику концентрации нафталина с исходным содержанием 1, 2 и 3 г/л в синтетической сточной воде. Начальное число клеток *Bacillus megaterium* МК64-1 в среде составило $1,7 \times 10^7$ КОЕ/мл. На 1-е сутки опыта концентрация нафталина снизилась до сотых долей грамма, при этом количество микроорганизмов увеличилось до 10^9 КОЕ/мл (в вариантах с начальным количеством нафталина 1 и 2 г/л) и до 10^{11} КОЕ/мл (в вариантах со стартовым количеством нафталина 3 г/л). За 14 суток значение pH среды как в опытных, так и в контрольном вариантах с добавлением суспензии микроорганизмов снизилось в среднем на 0,7 ед. (с 8,56 до 7,86). За это время величина редокс-потенциала среды в опытных вариантах увеличилась в среднем на 70 мВ. Выявлена весьма тесная прямая корреляция ($p < 0,05$) между исходной концентрацией и количеством деградированного бактериями поллютанта. Определение дегидрогеназной активности *Bacillus megaterium* двумя методами (с 2,3,5-трифенилтетразолия хлоридом и с метиленовым синим), а также определение чувствительности микроорганизмов к концентрациям углеводорода 1, 2 и 3 г/л диско-диффузионным методом показали отсутствие токсического действия исследуемых концентраций поллютанта на бактерии в условиях опыта. Результаты экспериментальной работы позволяют сделать вывод о способности штамма *Bacillus megaterium* МК64-1 к биодеструкции нафталина.

Ключевые слова: *Bacillus megaterium*, биodeградация, нафталин, кислотность, редокс-потенциал, токсичность, сточная вода

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Департамента образования и науки Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в рамках научного проекта № 2023-227-05.

Для цитирования: Коваленко С.А., Купчинский А.Б., Стом Д.И. Динамика концентрации нафталина в водной среде в присутствии *Bacillus megaterium* // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 4. С. 548–555. DOI: 10.21285/achb.950. EDN: XFPEVA.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Naphthalene concentration dynamics in an aqueous medium in the presence of *Bacillus megaterium*

Svetlana A. Kovalenko*, Alexander B. Kupchinsky*, Devard I. Stom*****✉

*Baikal Museum SB RAS, Listvyanka, Russian Federation

**Surgut State University, Surgut, Russian Federation

***Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

****Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The study examined the concentration dynamics of naphthalene, with its initial concentrations of 1, 2, and 3 g/L in synthetic wastewater. The initial number of *Bacillus megaterium* MK64-1 cells in the medium amounted

to 1.7×10^7 CFU/mL. On day 14 of the experiment, the concentration of naphthalene decreased to hundredths of a gram, while the microbial count increased to 10^9 CFU/mL (at the initial naphthalene concentrations of 1 and 2 g/L) and 10^{11} CFU/mL (at the initial naphthalene concentration of 3 g/L). After 14 days, the medium pH decreased by an average of 0.7 units (from 8.56 to 7.86) in both test and control media, with the addition of a microbial suspension. During this time, the redox potential of the medium increased by an average of 70 mV in the test media. Quite a strong direct correlation ($p < 0.05$) was found between the initial concentration and the amount of pollutant degraded by bacteria. The determination of dehydrogenase activity in *Bacillus megaterium* by means of two methods (with 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride and methylene blue), as well as microbial sensitivity to hydrocarbon concentrations of 1, 2, and 3 g/L via the disk-diffusion method, showed no toxic effect of the analyzed pollutant concentrations on bacteria under the experimental conditions. The obtained results indicate the ability of *Bacillus megaterium* strain MK64-1 to biodegrade naphthalene.

Keywords: *Bacillus megaterium*, biodegradation, naphthalene, acidity, redox potential, toxicity, wastewater

Funding. The Department of Education and Science of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra supported this work (Grant no. 2023-227-05).

For citation: Kovalenko S.A., Kupchinsky A.B., Stom D.I. Naphthalene concentration dynamics in an aqueous medium in the presence of *Bacillus megaterium*. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(4):548-555. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.950. EDN: XFPEVA.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня антропогенное загрязнение окружающей среды достигло уровня, способного вызывать необратимые изменения в биосфере [1, 2]. В водной среде все более возрастает количество самых различных загрязнителей [3]. Потенциальная токсичность, канцерогенность, тератогенность, мутагенность, способность к сорбции и кумуляции, химическая устойчивость полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) делают эту группу веществ особенно опасной [4–6]. Основными источниками загрязнения экосистем ПАУ являются предприятия, использующие в производственном цикле термическую обработку органического сырья [7, 8]. Нафталин – широко распространенный загрязнитель, простейший представитель класса ПАУ. Агентством по охране окружающей среды США (англ.: United States Environmental Protection Agency) нафталин отнесен к приоритетным загрязнителям к группе возможно канцерогенных для человека [9–11]. Известен ряд методов для удаления ПАУ из окружающей среды [12–14]. Особенно большой интерес вызывает технология биологической деструкции ПАУ, основанная на использовании способности микроорганизмов и растений использовать загрязнители в качестве источников углерода и энергии [15, 16]. В разрушении ароматических углеводородов важную роль играют различные виды бактерий, грибов, цианобактерий [14, 17, 18]. Сообщений об использовании *Bacillus megaterium* MK64-1 в качестве биодеструктора нафталина нами в литературных источниках не найдено.

Цель данной работы – оценка способности штамма *B. megaterium* MK64-1 к деструкции нафталина в водной среде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали штамм *B. megaterium* MK64-1 (MK64-1«R»). Штамм депонирован в Национальном биоресурсном центре Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – ГосНИИгенетика (регистрационный номер В-7998). Культивирование *B. megaterium* проводили на мясепептонном агаре.

Постановку эксперимента выполняли в асептических условиях. Для опыта использовали суспензию бактерий в синтетической сточной воде (ССВ)¹. Начальная концентрация 3-суточной культуры микроорганизмов в среде составила 1.7×10^7 КОЕ/мл. Единственным источником углерода и энергии в ССВ служил нафталин (99%, Acros Organics, Fisher Scientific, Чешская Республика) в количестве 1, 2 и 3 г/л. Среда стерилизовали насыщенным паром под давлением 1 атм. при 121 °С в течение 20 мин. В пробирки вносили по 0,1, 0,2 или 0,3 мл 10%-го раствора нафталина в ацетонитриле. После полного испарения растворителя добавляли по 10 мл суспензии *B. megaterium* в ССВ в каждую пробирку, получая тем самым растворы с рабочими концентрациями нафталина. Пробирки закрывали герметично, максимально вытеснив избыток жидкости. В качестве контрольных вариантов использовали суспензию *B. megaterium* без органического субстрата и растворы нафталина в ССВ. Культуральную жидкость в пробирках инкубировали при 30 °С. Параметры системы определяли в начале опыта, на 4-е и 14-е сутки эксперимента.

Водородный показатель (рН) и редокс-потенциал среды измеряли с помощью рН-метра рН-150МИ с комбинированными стеклянными электродами ЭСК-10601/7 (рН-электрод) и ЭРП-105 (редокс-электрод).

Учет общего микробного числа (ОМЧ) проводили методом Коха.

Концентрацию нафталина определяли с помощью системы высокоэффективной жидкостной хроматографии Agilent серии 1200 (Agilent Technologies, США) с диодноматричным детектором на длинах волн 210 и 220 нм. Экстракцию нафталина из пробы осуществляли гексаном. Разделение проводили на колонке Agilent Zorbax Eclipse Plus C18 Analytical (250×4,6 мм, 5 мкм). Анализ выполняли в системе 10% вода – 90% ацетонитрил. Скорость элюирования – 1 мл/мин. Температура хроматографирования – 40 °С.

О токсичности нафталина в диапазоне концентраций от 1 до 3 г/л в отношении *B. megaterium* судили по уровню дегидрогеназной активности бактерий. Исполь-

¹ ГОСТ Р 50595-93. Вещества поверхностно-активные. Метод определения биоразлагаемости в водной среде. М.: Издательство стандартов, 1994. 42 с.

зовали реактивы 2,3,5-трифенилтетразолия хлорид² и метиленовый синий³.

Для оценки чувствительности штамма к исследуемым концентрациям ПАУ применили диско-диффузионный метод⁴.

Все опыты ставили в пяти биологических и не менее чем в трех аналитических повторностях.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью компьютерных программ Past 3 и Microsoft Excel 2016. Достоверность данных определяли по критерию Стьюдента с уровнем значимости $p < 0,05$. Для выявления и количественной оценки зависимостей между параметрами системы использовали корреляционно-регрессионный анализ [19]. Результаты представлены в виде средних арифметических величин и их стандартных отклонений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

О способности бактерий *B. megaterium* к биодegradации нафталина судили по изменению концентрации ПАУ в ССВ в течение 4 дней. Также определили его количество на 14-е сутки опыта.

За двухнедельный период наблюдений отмечено снижение значения pH среды во всех вариантах с *B. megaterium* в среднем на 0,7 ед. (рис. 1, а).

На 4-е сутки эксперимента редокс-потенциал среды в опытных вариантах уменьшился в среднем на 14,0 мВ от исходного значения (рис. 1, б). На 14-е сутки значение показателя превышало исходное на 40%.

В контрольном варианте (без субстрата) редокс-потенциал среды на 14-е сутки практически не изменился. В контрольных вариантах с нафталином, где суспензию бактерий не добавляли, существенных колебаний кислотности и редокс-потенциала среды не зафиксировано, концентрация нафталина во время наблюдений оставалась на исходном уровне.

На 4-е сутки эксперимента в опытных вариантах нафталин выявлен в количестве от 40 мг/л (в варианте с исходной концентрацией ПАУ 1 г/л) до 110 мг/л (в варианте с начальной концентрацией ПАУ 3 г/л) (рис. 2). На 14-е сутки концентрация нафталина опытных вариантов с исходным количеством загрязнителя 1, 2 и 3 г/л составила 15, 48 и 63 мг/л соответственно.

На 4-е сутки эксперимента ОМЧ опытных вариантов со стартовыми концентрациями 1 и 2 г/л нафталина выше, чем ОМЧ контрольного варианта, на 32 и 114% соответственно. На 14-е сутки ОМЧ несколько снижается, но значение – выше исходного в 420 и 470 раз соответственно (табл. 1). ОМЧ варианта с 3 г/л нафталина к четвертому дню опыта возросло в 3,5 раза от исходного, что ниже ОМЧ контрольного варианта на 100%. К 14-м суткам ОМЧ увеличилось в 8800 раз от исходного, что выше ОМЧ контрольного варианта в 38 раз.

Корреляция между динамикой ОМЧ и исходной концентрацией нафталина, а также между динамикой ОМЧ и количеством усвоенного бактериями нафталина статистически не подтверждена ($p < 0,05$) (табл. 2).

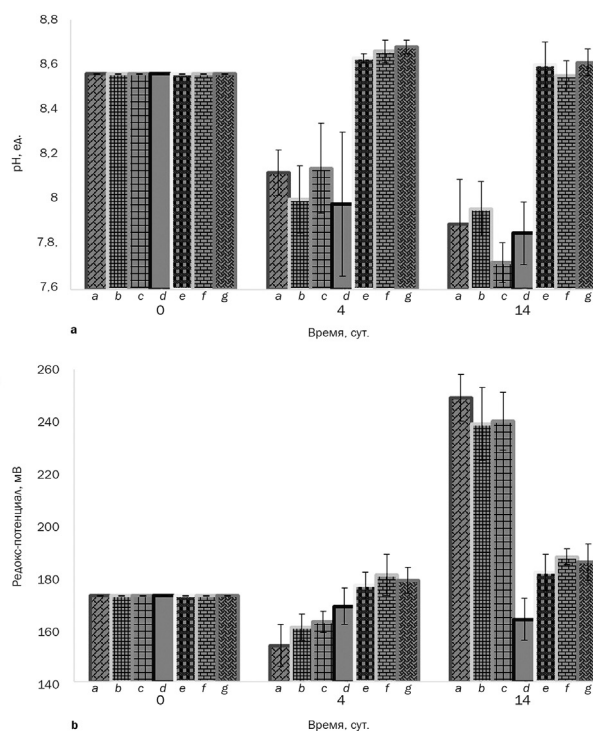


Рис. 1. Динамика активной кислотности (а) и редокс-потенциала (б) культуральной жидкости *Bacillus megaterium* (среда – синтетическая сточная вода, органический субстрат – нафталин): а – *Bacillus megaterium* + 1 г/л нафталина; б – *Bacillus megaterium* + 2 г/л нафталина; с – *Bacillus megaterium* + 3 г/л нафталина; д – *Bacillus megaterium*; е – 1 г/л нафталина; ф – 2 г/л нафталина; г – 3 г/л нафталина

Fig. 1. Dynamics of active acidity (a) and redox potential (b) of the culture liquid of *Bacillus megaterium* (medium – synthetic waste water, organic substrate – naphthalene): а – *Bacillus megaterium* + 1 g/l naphthalene; б – *Bacillus megaterium* + 2 g/l naphthalene; с – *Bacillus megaterium* + 3 g/l naphthalene; д – *Bacillus megaterium*; е – 1 g/l naphthalene; ф – 2 g/l naphthalene; г – 3 g/l naphthalene

Весьма тесная прямая корреляция между исходной концентрацией и количеством усвоенного бактериями нафталина выявлена как на 4-е, так и на 14-е сутки опыта ($p < 0,05$). Ошибка аппроксимации данной зависимости близка к 0%, что говорит о высоком уровне соответствия эмпирической и расчетной модели регрессии на 4-е и 14-е сутки опыта.

Снижение pH можно рассматривать как признак активного выделения бактериями кислых метаболитов. Например, группой исследователей Санкт-Петербургского государственного аграрного университета при секвенировании ДНК штамма *B. megaterium* В-4801 выявлены гены, ответственные за продукцию ряда органических

² МУК 4.2.026-95. Экспресс-метод определения антибиотиков в пищевых продуктах. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1995. 14 с.

³ Инструкция по лабораторному контролю очистных сооружений на животноводческих комплексах. Часть III. Определение биогенных веществ. Анализ осадков и ила. Утв. 17.11.1980.

⁴ МУК 4.2.1890-04. Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 91 с.

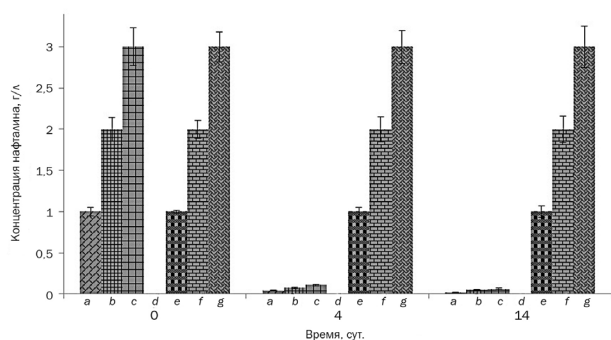


Рис. 2. Динамика концентрации нафталина в среде (среда – синтетическая сточная вода, органический субстрат – нафталин, биоагент – *Bacillus megaterium*):
а – *Bacillus megaterium* + 1 г/л нафталина;
б – *Bacillus megaterium* + 2 г/л нафталина;
с – *Bacillus megaterium* + 3 г/л нафталина;
д – *Bacillus megaterium*; е – 1 г/л нафталина;
ф – 2 г/л нафталина; г – 3 г/л нафталина

Fig. 2. Dynamics of naphthalene concentration in the medium (medium – synthetic waste water, organic substrate – naphthalene, bioagent – *Bacillus megaterium*):
а – *Bacillus megaterium* + 1 g/l naphthalene;
б – *Bacillus megaterium* + 2 g/l naphthalene;
с – *Bacillus megaterium* + 3 g/l naphthalene;
д – *Bacillus megaterium*; е – 1 g/l naphthalene;
ф – 2 g/l naphthalene; г – 3 g/l naphthalene

кислот (пальмитиновой, масляной, капроновой и др.) [20]. Наличие нафталина в среде и его концентрация в пределах от 1 до 3 г/л существенно не влияют на динамику рН ($p < 0,05$). Динамика редокс-потенциала

среды говорит об активном биологическом окислении нафталина с накоплением в питательной среде промежуточных метаболитов – скорее всего, производных органических кислот, способных выступать в роли восстановителей. К 14-м суткам опыта возрастает интенсивность расщепления интермедиатов.

Прослеживается аналогия с данными, полученными А. Тарафдаром с соавторами [18]. В процессе эксперимента они отметили способность генетически родственного вида *Bacillus thuringiensis* к биodeградации антрацена (снижение концентрации загрязнителя в течение 14 суток с 40,0 до 3,6 мг/л, сопровождающееся ростом биомассы). В нашей работе зафиксировано удаление нафталина из среды и увеличение количества клеток *B. megaterium*. В опытах Ч. Линь и др. [13] показана способность *Bacillus fusiformis* утилизировать более 90% нафталина за 4 дня при начальной концентрации ПАУ в среде 50 мг/л, так же, как и в нашей работе, зарегистрировано снижение рН среды на единицу.

Результаты анализа полученных данных (задержка роста биомассы бактериальных клеток с последующим скачком на фоне активного снижения содержания загрязнителя в среде, отсутствие корреляции между ОМЧ и количеством ПАУ) позволили предположить, что нафталин в концентрации 3 г/л, а также его интермедиаты могут оказывать некоторое токсическое действие на *B. megaterium* МК64-1. Токсичность ПАУ могла проявиться в стрессовом ускорении его деградации микроорганизмом. Похожий вывод при работе с *B. fusiformis* сделал и Ч. Линь с соавторами [10, 13]. Возможно, динамика концентрации субстрата послужила причиной медленного роста числа клеток в начале опыта в варианте с 3 г/л нафталина и резкого роста ОМЧ к 14-м суткам.

Таблица 1. Динамика микробного числа штамма *Bacillus megaterium* МК64-1 в синтетической сточной воде в присутствии нафталина, КОЕ/мл

Table 1. Dynamics of the microbial number of *Bacillus megaterium* МК64-1 in synthetic wastewater in the presence of naphthalene, CFU/ml

Продолжительность, сут.	Контрольный опыт без нафталина	Концентрация нафталина, г/л		
		1	2	3
0	$1,7 \times 10^7 \pm 9,7 \times 10^5$	$1,7 \times 10^7 \pm 9,7 \times 10^5$	$1,7 \times 10^7 \pm 9,7 \times 10^5$	$1,7 \times 10^7 \pm 9,7 \times 10^5$
4	$5,6 \times 10^9 \pm 2,1 \times 10^8$	$7,4 \times 10^9 \pm 3,2 \times 10^8$	$1,2 \times 10^{10} \pm 4,0 \times 10^8$	$5,8 \times 10^7 \pm 4,2 \times 10^6$
14	$3,9 \times 10^9 \pm 1,4 \times 10^8$	$7,2 \times 10^9 \pm 3,0 \times 10^8$	$8,0 \times 10^9 \pm 2,8 \times 10^7$	$1,5 \times 10^{11} \pm 2,2 \times 10^{10}$

Таблица 2. Статистические параметры зависимостей между динамикой микробного числа штамма *Bacillus megaterium* МК64-1, исходной концентрацией нафталина и количеством деградированного бактериями нафталина в водной среде

Table 2. Statistical parameters of the relationships between the dynamics of the microbial number of *Bacillus megaterium* МК64-1, the initial concentration of naphthalene and the amount of naphthalene degraded by bacteria in aqueous medium

Зависимость показателей	Продолжительность, сут.	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации, %	Ошибка аппроксимации, %
Исходная концентрация нафталина – Микробное число <i>Bacillus megaterium</i>	4	$y = -10^9 x + 8 \times 10^9$	9,89	480,92
	14	$y = 4 \times 10^{10} x - 2 \times 10^{10}$	62,27	101,17
Микробное число <i>Bacillus megaterium</i> – Количество деградированного бактериями нафталина	4	$y = -10^{-10} x + 2,5580$	37,03	14,55
	14	$y = 10^{-11} x + 1,3886$	75,88	8,14
Исходная концентрация нафталина – Количество деградированного бактериями нафталина	4	$y = 0,9637x - 0,0013$	99,99	0,02
	14	$y = 0,9778x + 0,0018$	99,99	0,08

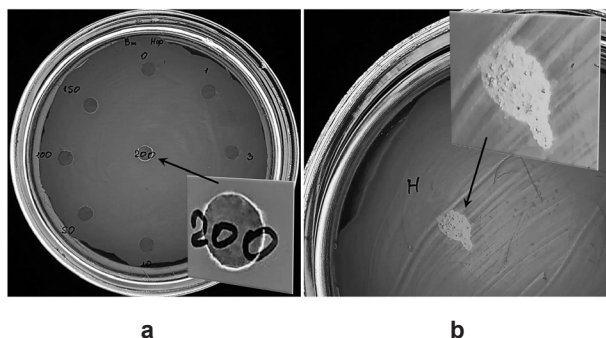


Рис. 3. Определение чувствительности *Bacillus megaterium* к нафталину диско-диффузионным методом:
 а – концентрации до 200 г/л нафталина;
 б – порошок нафталина (99%)

Fig. 3. Determination of *Bacillus megaterium* sensitivity to naphthalene by the disk-diffusion method:
 а – concentrations up to 200 g/l of naphthalene;
 б – powder of naphthalene (99%)

При определении дегидрогеназной активности *B. megaterium* как методом с 2,3,5-трифенилтетразолия хлоридом, так и методом с метиленовым синим, изменение показателей активности фермента опытных вариантов относительно контрольного не существенно в

вариантах с начальным количеством загрязнителя 1 и 2 г/л, а в варианте с начальным количеством загрязнителя 3 г/л составило 15% (с метиленовым синим) и 21% (с 2,3,5-трифенилтетразолия хлоридом) в сторону усиления активности дегидрогеназы.

При тестировании концентраций нафталина 1, 2 и 3 г/л диско-диффузионным методом чувствительность к ним *B. megaterium* в условиях опыта не выявлена (рис. 3). При непосредственном контакте бактериальных клеток с порошком нафталина (99%) наблюдали появление зоны задержки роста колоний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов установлена способность бактерий *B. megaterium* к биодеструкции нафталина. Содержание данного ПАУ в водной среде в диапазоне начальных концентраций 1–3 г/л за 14 дней снизилось до сотых долей грамма на фоне увеличения количества микроорганизмов в 100–8800 раз. При тестировании *B. megaterium* на чувствительность к загрязнителю и определении дегидрогеназной активности бактерий в присутствии ПАУ токсическое действие исследуемых концентраций нафталина в отношении штамма *B. megaterium* МК64-1 в условиях опыта не выявлено.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Basumatary T., Parthipan P., Sarma H. Microbial contributions in restoring degraded biosphere habitats: comparing natural and engineered approaches // *Biotechnology of Emerging Microbes. Prospects for Agriculture and Environment* / eds H. Sarma, S.J. Joshi. Elsevier, 2024. P. 107–125. DOI: 10.1016/B978-0-443-15397-6.00008-5.
- Edo G.I., Itoje-akpokiniyovo L.O., Obasohan P., Ikpekoru V.O., Samuel P.O., Jikahet A.N., et al. Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change // *Ecological Frontiers*. 2024. Vol. 44, no. 5. P. 874–889. DOI: 10.1016/j.ecofro.2024.02.014.
- Yi Y., Xie B., Zhao T., Li Z., Stom D., Liu H. Effect of external resistance on the sensitivity of microbial fuel cell biosensor for detection of different types of pollutants // *Bioelectrochemistry*. 2019. Vol. 125. P. 71–78. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2018.09.003.
- Кузьмин В.В., Болдырев К.А. Гидрохимическое моделирование миграции растворенных нефтепродуктов в подземных водах // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2021. N 11. С. 43–51. DOI: 10.35776/VST.2021.11.05. EDN: SDOTMG.
- Carmichael A.B., Wong L.-L. Protein engineering of *Bacillus megaterium* CYP102. The oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons // *European Journal of Biochemistry*. 2001. Vol. 268, no. 10. P. 3117–3125. DOI: 10.1046/j.1432-1327.2001.02212.x.
- Johnson O.A., Affam A.C. Petroleum sludge treatment and disposal: a review // *Environmental Engineering Research*. 2019. Vol. 24, no. 2. P. 191–201. DOI: 10.4491/eer.2018.134.
- Ali M., Xu D., Yang X., Hu J. Microplastics and PAHs mixed contamination: an in-depth review on the sources, co-occurrence, and fate in marine ecosystems // *Water Research*. 2024. Vol. 257. P. 121622. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121622.
- Aydin D.C., Faber S.C., Attiani V., Eskes J., Aldas-Vargas A., Grotenhuis T., et al. Indene, indane and naphthalene in a mixture with BTEX affect aerobic compound biodegradation kinetics and indigenous microbial community development // *Chemosphere*. 2023. Vol. 340. P. 139761. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139761.
- Chang Y.-I., Cheng H.-P., Lai S.-H., Ning H. Biodegradation of naphthalene in the oil refinery wastewater by enriched activated sludge // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2014. Vol. 86. Part C. P. 272–277. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.09.018.
- Lin C., Gan L., Chen Z., Megharaj M., Naidu R. Biodegradation of naphthalene using a functional biomaterial based on immobilized *Bacillus fusiformis* (BFN) // *Biochemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 90. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.bej.2014.05.003.
- Rockne K.J., Strand S.E. Anaerobic biodegradation of naphthalene, phenanthrene, and biphenyl by a denitrifying enrichment culture // *Water Research*. 2001. Vol. 35, no. 1. P. 291–299. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00246-3.
- Bagi A., Pampanin D.M., Lanzén A., Bilstad T., Kommedal R. Naphthalene biodegradation in temperate and arctic marine microcosms // *Biodegradation*. 2014. Vol. 25. P. 111–125. DOI: 10.1007/s10532-013-9644-3.
- Lin C., Gan L., Chen Z.-L. Biodegradation of naphthalene by strain *Bacillus fusiformis* (BFN) // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 182, no. 1-3. P. 771–777. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.101.
- Shen X., Dong W., Wan Y., Feng K., Liu Y., Wei Y. Influencing mechanisms of siderite and magnetite, on naphthalene biodegradation: Insights from degradability and mineral surface structure // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 299. P. 113648. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113648.
- Saeed M., Ilyas N., Bibi F., Jayachandran K., Dat-tamudi S., Elgorban A.M. Biodegradation of PAHs by *Bacillus*

marsiflavi, genome analysis and its plant growth promoting potential // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 292. Part B. P. 118343. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118343.

16. Sharma P., Gaur P., Dwivedi S., Kumari K., Srivastava J.K., Dhakar K., et al. Harnessing microbial potentials by advancing bioremediation of PAHs through molecular insights and genetics // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2024. Vol. 194. P. 105861. DOI: 10.1016/j.ibiod.2024.105861.

17. Кошелева И.А., Кочетков В.В., Филонов А.Е., Пунтус И.Ф., Соколов С.Л., Анохина Т.О. [и др.]. Плазмиды бактерий рода *Pseudomonas* // *История науки и техники*. 2020. N 6. С. 59–78. DOI: 10.25791/intstg.06.2020.1192. EDN: QZBECK.

18. Tarafdar A., Sinha A. Mastro R.E. Biodegradation of

anthracene by a newly isolated bacterial strain, *Bacillus thuringiensis* AT.ISM.1, isolated from a fly ash deposition site // *Letters in Applied Microbiology*. 2017. Vol. 65, no. 4. P. 327–334. DOI: 10.1111/lam.12785.

19. Даниленко А.О., Георгиади А.Г. Влияние современного потепления на водный и ионный сток Северной Двины // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. N 1. С. 64–69. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-064-069. EDN: AUBAXL.

20. Лаптев Г.Ю., Йылдырым Е.А., Дуняшев Т.П., Ильина Л.А., Тюрина Д.Г., Филиппова В.А. [и др.]. Геномный и фенотипический потенциал антимикробной активности штамма бактерии *Bacillus megaterium* В-4801 // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. N 4. С. 816–829. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.4.816rus. EDN: ZHGJOC.

REFERENCES

1. Basumatary T., Parthipan P., Sarma H. Microbial contributions in restoring degraded biosphere habitats: comparing natural and engineered approaches. In: Sarma H., Joshi S.J. (eds). *Biotechnology of Emerging Microbes. Prospects for Agriculture and Environment*. Elsevier; 2024, p. 107-125. DOI: 10.1016/B978-0-443-15397-6.00008-5.

2. Edo G.I., Itoje-akpokiniyo L.O., Obasohan P., Ikpekoru V.O., Samuel P.O., Jikahet A.N., et al. Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change. *Ecological Frontiers*. 2024;44(5):874-889. DOI: 10.1016/j.ecofro.2024.02.014.

3. Yi Y., Xie B., Zhao T., Li Z., Stom D., Liu H. Effect of external resistance on the sensitivity of microbial fuel cell biosensor for detection of different types of pollutants. *Bioelectrochemistry*. 2019;125:71-78. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2018.09.003.

4. Kuzmin V.V., Boldyrev K. Hydrochemical modeling of migration of dissolved oil products in groundwater. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2021;11:43-51. (In Russian). DOI: 10.35776/VST.2021.11.05. EDN: SDOTMG.

5. Carmichael A.B., Wong L.-L. Protein engineering of *Bacillus megaterium* CYP102. The oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons. *European Journal of Biochemistry*. 2001;268(10):3117-3125. DOI: 10.1046/j.1432-1327.2001.02212.x.

6. Johnson O.A., Affam A.C. Petroleum sludge treatment and disposal: a review. *Environmental Engineering Research*. 2019;24(2):191-201. DOI: 10.4491/eer.2018.134.

7. Ali M., Xu D., Yang X., Hu J. Microplastics and PAHs mixed contamination: an in-depth review on the sources, co-occurrence, and fate in marine ecosystems. *Water Research*. 2024;257:121622. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121622.

8. Aydin D.C., Faber S.C., Attiani V., Eskes J., Aldas-Vargas A., Grotenhuis T., et al. Indene, indane and naphthalene in a mixture with BTEX affect aerobic compound biodegradation kinetics and indigenous microbial community development. *Chemosphere*. 2023;340:139761. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139761.

9. Chang Y.-I., Cheng H.-P., Lai S.-H., Ning H. Biodegradation of naphthalene in the oil refinery wastewater by enriched activated sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2014;86:272-277. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.09.018.

10. Lin C., Gan L., Chen Z., Megharaj M., Naidu R. Biodegradation of naphthalene using a functional bioma-

terial based on immobilized *Bacillus fusiformis* (BFN). *Biochemical Engineering Journal*. 2014;90:1-7. DOI: 10.1016/j.bej.2014.05.003.

11. Rockne K.J., Strand S.E. Anaerobic biodegradation of naphthalene, phenanthrene, and biphenyl by a denitrifying enrichment culture. *Water Research*. 2001;35(1):291-299. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00246-3.

12. Bagi A., Pampanin D.M., Lanzén A., Bilstad T., Kommedal R. Naphthalene biodegradation in temperate and arctic marine microcosms. *Biodegradation*. 2014;25:111-125. DOI: 10.1007/s10532-013-9644-3.

13. Lin C., Gan L., Chen Z.-L. Biodegradation of naphthalene by strain *Bacillus fusiformis* (BFN). *Journal of Hazardous Materials*. 2010;182(1-3):771-777. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.101.

14. Shen X., Dong W., Wan Y., Feng K., Liu Y., Wei Y. Influencing mechanisms of siderite and magnetite, on naphthalene biodegradation: Insights from degradability and mineral surface structure. *Journal of Environmental Management*. 2021;299:113648. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113648.

15. Saeed M., Ilyas N., Bibi F., Jayachandran K., Datamudi S., Elgorban A.M. Biodegradation of PAHs by *Bacillus marsiflavi*, genome analysis and its plant growth promoting potential. *Environmental Pollution*. 2022;292:118343. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118343.

16. Sharma P., Gaur P., Dwivedi S., Kumari K., Srivastava J.K., Dhakar K., et al. Harnessing microbial potentials by advancing bioremediation of PAHs through molecular insights and genetics. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2024;194:105861. DOI: 10.1016/j.ibiod.2024.105861.

17. Kosheleva I.A., Kochetkov V.V., Filonov A.E., Puntus I.F., Sokolov S.L., Anokhina T.O., et al. Plasmids of bacteria of the genus *Pseudomonas*. *History of Science and Engineering*. 2020;6:59-78. (In Russian). DOI: 10.25791/intstg.06.2020.1192. EDN: QZBECK.

18. Tarafdar A., Sinha A. Mastro R.E. Biodegradation of anthracene by a newly isolated bacterial strain, *Bacillus thuringiensis* AT.ISM.1, isolated from a fly ash deposition site. *Letters in Applied Microbiology*. 2017;65(4):327-334. DOI: 10.1111/lam.12785.

19. Danilenko A.O., Georgiadi A.G. The influence of modern climate warming on the water flow and major ion flux of the Northern Dvina. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;1:64-69. (In Russian). DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-064-069. EDN: AUBAXL.

20. Laptev G.Yu., Yildirim E.A., Dunyashev T.P., Ilyina L.A., Tyurina D.G., Filippova V.A., et al. Genomic and phenotypic potential of antimicrobial activity of a bacillus

strain *Bacillus megaterium* B-4801. *Agricultural Biology*. 2020;55(4):816-829. (In Russian). DOI: 10.15389/agrobiology.2020.4.816rus. EDN: ZHGJOC.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коваленко Светлана Анатольевна,
аспирант,
Байкальский музей СО РАН,
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,
Российская Федерация,
kovsvan@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-4259-397X>

Купчинский Александр Борисович,
к.б.н., директор,
Байкальский музей СО РАН,
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,
Российская Федерация,
albor67@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

Стом Дэвард Иосифович,
д.б.н., профессор,
главный научный сотрудник,
Байкальский музей СО РАН,
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,
Российская Федерация,
ведущий научный сотрудник,
Сургутский государственный университет,
628412, г. Сургут, пр. Ленина, 1,
Российская Федерация,
профессор,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
профессор,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉ stomd@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Вклад авторов

С.А. Коваленко – постановка задачи, разработка концепции и методологии исследования, проведение экспериментов, обработка полученных данных, обсуждение результатов, написание текста статьи, редактирование текста статьи.
А.Б. Купчинский – постановка задачи, обсуждение результатов, редактирование текста статьи.
Д.И. Стом – постановка задачи, обсуждение результатов, редактирование текста статьи.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana A. Kovalenko,
Postgraduate Student,
Baikal Museum SB RAS,
1, Academic St., Listvyanka, 664520,
Russian Federation,
kovsvan@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-4259-397X>

Alexander B. Kupchinsky,
Cand. Sci. (Biology), Director,
Baikal Museum SB RAS,
1, Academic St., Listvyanka, 664520,
Russian Federation,
albor67@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

Devard I. Stom,
Dr. Sci. (Biology), Professor,
Chief Researcher,
Baikal Museum SB RAS,
1, Akademicheskaya St., Listvyanka, 664520,
Russian Federation;
Leading Researcher,
Surgut State University,
1, Lenin Ave., Surgut, 628412,
Russian Federation;
Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
✉ stomd@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Contribution of the authors

Svetlana A. Kovalenko – problem formulation, research concept and methodology development, conducting experiments, data processing, results discussion, writing and editing the text of manuscript.
Alexander B. Kupchinsky – problem formulation, results discussion, editing the text of manuscript.
Devard I. Stom – problem formulation, results discussion, editing the text of manuscript.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.08.2024.
Одобрена после рецензирования 28.11.2024.
Принята к публикации 30.11.2024.

Information about the article

The article was submitted 27.08.2024.
Approved after reviewing 28.11.2024.
Accepted for publication 30.11.2024.