

УДК 579.64 : 631.46(470.21)

Деструкционная активность углеводородокисляющих микромицетов, выделенных из субстратов прибрежных территорий Баренцева и Белого морей

Е. А. Исакова*, М. В. Корнейкова

*Лаборатория медицинских и биологических технологий КНЦ РАН; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: ya.kristina-i2014@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-0953>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 20.04.2021; получена после доработки 10.06.2021

Ключевые слова:

микроскопические грибы, углеводород-окисляющая активность, морские экосистемы, биоремедиация, нефтезагрязнение

Проанализирована углеводородокисляющая активность 33 штаммов микромицетов, выделенных из воды и грунтов прибрежных территорий Белого и Баренцева морей и относящихся к родам: *Acremonium*, *Aspergillus*, *Meyerozyma*, *Oidiodendron*, *Paradendryphiella*, *Penicillium*, *Pseudoqymnoascus*, *Tolypocladium*, *Trichoderma*, *Sarcocladium*, *Talaromyces*, *Umbelopsis*. Исследования по углеводородокисляющей активности грибов проводили в лабораторном эксперименте в течение двух временных периодов: 14 и 28 суток. Остаточную концентрацию углеводородов нефти в среде определяли методом инфракрасной спектроскопии. Установлено, что микромицеты обладали разной нефтеструкционной способностью. Снижение содержания нефтепродуктов для тестируемых штаммов за 14 суток составило от 11 до 83 %. Наибольшей нефтеструктивной активностью обладали штаммы *Tolypocladium inflatum* st.1, *T. inflatum* st.2, *Penicillium thomii*, *Meyerozyma guilliermondii*, *Penicillium simplicissimum*, *P. camemberti*, *P. solitum* и *Trichoderma minutisporum*, снижающие концентрацию в среде на 57–83 %. Данные микромицеты выделены из прибрежных субстратов, содержание нефтепродуктов в которых не превышало ПДК. Отмечено, что некоторые отдельные штаммы микроскопических грибов обладают высокой нефтеструкционной активностью более длительный период времени: *Tolypocladium cylindrosporum* снижал содержание нефтяных углеводородов за 28 суток на 95 %. Не выявлено четкой связи между грибной биомассой и степенью разложения нефтепродуктов, однако отдельные толерантные виды микромицетов способны активно разлагать углеводороды нефти, существенно не увеличивая своей биомассы. Выявленные активные штаммы нефтеокисляющих микромицетов могут быть использованы для создания биопрепаратов с перспективой их дальнейшего применения для биоремедиации при нефтяных разливах в северных морских экосистемах.

Для цитирования

Исакова Е. А. и др. Деструкционная активность углеводородокисляющих микромицетов, выделенных из субстратов прибрежных территорий Баренцева и Белого морей. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 2. С. 178–189. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-178-189>.

Destructive activity of hydrocarbon-oxidizing micromycetes extracted from the substrates of the coastal areas, the Barents and White Seas

Ekaterina A. Isakova*, Maria V. Korneykova

*Laboratory of Medical and Biological Technologies KSC RAS; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: ya.kristina-i2014@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-0953>

Article info

Abstract

Received 20.04.2021;

received in revised form 10.06.2021

Key words:

microscopic fungi, hydrocarbon-oxidizing activity, marine ecosystems, bioremediation, oil pollution

We analyzed the hydrocarbon-oxidizing activity of 33 micromycetes strains isolated from water and soils of the White Sea and Barents Sea coastal territories. The microscopic fungi studied were represented by the following genera: *Acremonium*, *Aspergillus*, *Meyerozyma*, *Oidiodendron*, *Paradendryphiella*, *Penicillium*, *Pseudoqymnoascus*, *Tolypocladium*, *Trichoderma*, *Sarcocladium*, *Talaromyces*, *Umbelopsis*. Hydrocarbon-oxidizing activity of fungi was carried out in a laboratory experiment for two time periods: 14 and 28 days. The residual concentration of oil hydrocarbons in the medium was determined by the infrared spectrometry method. We revealed that micromycetes had different oil-destructive activity. The decrease in oil content for the strains over 14 days ranged from 11 to 83 %. *Tolypocladium inflatum* st.1, *T. inflatum* st.2, *Penicillium thomii*, *Meyerozyma guilliermondii*, *P. simplicissimum*, *P. camemberti*, *P. solitum* and *Trichoderma minutisporum* strains had the greatest oil destructive activity, reducing the concentration in the medium by 57–83 %. These micromycetes were isolated from coastal substrates, the content of oil products in which did not exceed the MPC. We found that some individual strains of microscopic fungi had high oil-destructive activity for a longer period of time: *Tolypocladium cylindrosporum* reduced the content of oil hydrocarbons for 28 days by 95 %. No clear relationship between the fungal biomass and the degree of decomposition of oil products was found, but some tolerant species of micromycetes can actively decompose oil hydrocarbons without significantly increasing their biomass. The identified active strains of hydrocarbon-oxidizing micromycetes can be used to create biopreparations with the prospect of their further use for bioremediation of oil spills in the northern marine ecosystems.

For citation

Isakova, E. A. et al. 2021. Destructive activity of hydrocarbon-oxidizing micromycetes extracted from the substrates of the coastal areas, the Barents and White Seas. *Vestnik of MSTU*, 24(2), pp. 178–189. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-178-189>.

Введение

В настоящее время нефть и нефтепродукты (НП) являются одними из самых распространенных веществ, загрязняющих воды Мирового океана (*Немировская, 2013*). Нефтяное загрязнение опасно в связи с высокой токсичностью и миграционной способностью отдельных компонентов нефти (*Тетельмин и др., 2013*). В результате загрязнения нарушаются естественные биоценозы, изменяется их видовое разнообразие, снижается продуктивная способность; в наземных экосистемах изменяется ферментативная активность почв (*Кузнецов и др., 2017*). Одним из наиболее эффективных методов ликвидации разливов нефти и НП на этапе доочистки загрязненных участков считается биоремедиация, основанная на способности микроорганизмов разрушать органические загрязнители, выступающие для микробиоты субстратом или источником питания (*Finley et al., 2010; Kumar et al., 2018*).

В морских экосистемах микромицеты встречаются в значительно меньшем количестве, чем бактерии, поэтому ранее им не уделялось достаточного внимания в вопросе биоремедиации морских загрязненных сред (*Kumar et al., 2018; Maamar et al., 2020*). Однако с начала XXI века стала развиваться такая ветвь биоремедиации, как микоремедиация. В ее основе лежит использование грибов для разложения или удаления токсических веществ из окружающей среды (*Singh, 2006; Husaini et al., 2008; Kumar et al., 2018*).

У микроскопических грибов есть ряд преимуществ перед бактериями. Грибы способны проникать внутрь твердых частиц (*Raghukumar, 2017*). Грибы обладают мицелиальным строением, поэтому имеют огромную адсорбционную поверхность (*Донерьян и др., 2016*), благодаря чему способны адсорбировать различного рода соединения, в том числе ксенобиотики, такие как фенол, фенольные соединения, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). В отличие от грибов, бактерии не могут эффективно разлагать ПАУ с более чем четырьмя ароматическими кольцами (*Leitão, 2009; Maamar et al., 2020*). Эффективность использования микромицетов в качестве утилизаторов нефти обусловлена их мощной ферментативной системой, а также высокой устойчивостью в условиях нефтезагрязнения (*Зволинский и др., 2010*). Есть сведения, что большинство видов морских грибов могут участвовать в процессах биоразложения нефти путем превращения нефтяных углеводородов в более растворимые в воде и менее токсичные для морской среды формы (*Kumar et al., 2018; Maamar et al., 2020*).

К наиболее распространенным микромицетам-деструкторам углеводов нефти (УН) относят не менее сотни видов микроскопических грибов (*Шануро и др., 2018*). Подавляющее количество таких грибов принадлежат родам: *Alternaria, Aspergillus, Candida, Cephalosporium, Cladosporium, Fusarium, Geotrichum, Gliocladium, Mucor, Paecilomyces, Penicillium, Rhizopus, Rhodotolura, Saccharomyces, Talaromyces, Torulopsis* и др. (*Al-Nasrawi, 2012; Kumar et al., 2018; Чаноргина и др., 2019*).

Известно, что количество микроорганизмов, способных использовать органический углерод нефти и НП в качестве единственного источника питания и энергии, сравнительно мало по сравнению с общим количеством микроорганизмов, обитающих в окружающей среде (*Lebkowska et al., 1995*). В связи с этим важно иметь наиболее полное представление о микроорганизмах-деструкторах НП, обитающих в разных природных средах (*Macaulay, 2015*) в разных климатических поясах, в том числе в арктических условиях. Природа Крайнего Севера характеризуется относительно низкой самоочищающей способностью в силу замедленности процессов энерго- и массообмена, а потому восстановление природных сред здесь проходит очень медленно (*Евдокимова и др., 2007*). Таким образом, настоящее исследование подтверждает свою актуальность.

Цель работы – поиск активных штаммов микромицетов-нефтедеструкторов, выделенных из потенциально нефтезагрязненных вод и грунтов прибрежных территорий Баренцева и Белого морей, с перспективой их дальнейшего применения для создания биопрепаратов, планируемых к использованию в северных условиях в мероприятиях по биоремедиации.

Материалы и методы

Характеристика района исследований

Отбор образцов субстратов (прибрежная почва, затапливаемые грунты приливно-отливной зоны, морская вода) проводили в Кандалакшском заливе в районе Беломорской биологической станции (ББС) (66°34' с. ш., 33°08' в. д.), а также на побережье Кольского залива в районах г. Кола (68°53' с. ш., 33°02' в. д.) и пос. Белокаменка (69°04' с. ш., 33°10' в. д.) (рис. 1).

Микроскопические грибы были выделены как из чистых, так и загрязненных НП субстратов. Согласно литературным данным (*Немировская и др., 2017*), средние концентрации УН в прибрежных районах Кандалакшского залива не достигали величины ПДК. По другим данным (*Климовский, 2017*), аналогично, уровень УН в поверхностных и придонных водах (2015 г.) не превышал рыбохозяйственный норматив (0,05 мг/дм³) (табл. 1).

По данным, представленным сотрудником лаборатории ИППЭС КНЦ РАН Мязиным В. А., в субстратах, отобранных в пос. Белокаменка, содержание УН также не превышало значения ПДК. В районе г. Кола,

наоборот, количество УН в воде, грунте литорали и прибрежной почве было в 6, 1,1 и 22 раза выше значений ПДК соответственно, т. е. данный участок на момент отбора проб (2017 г.) оказался загрязненным НП.

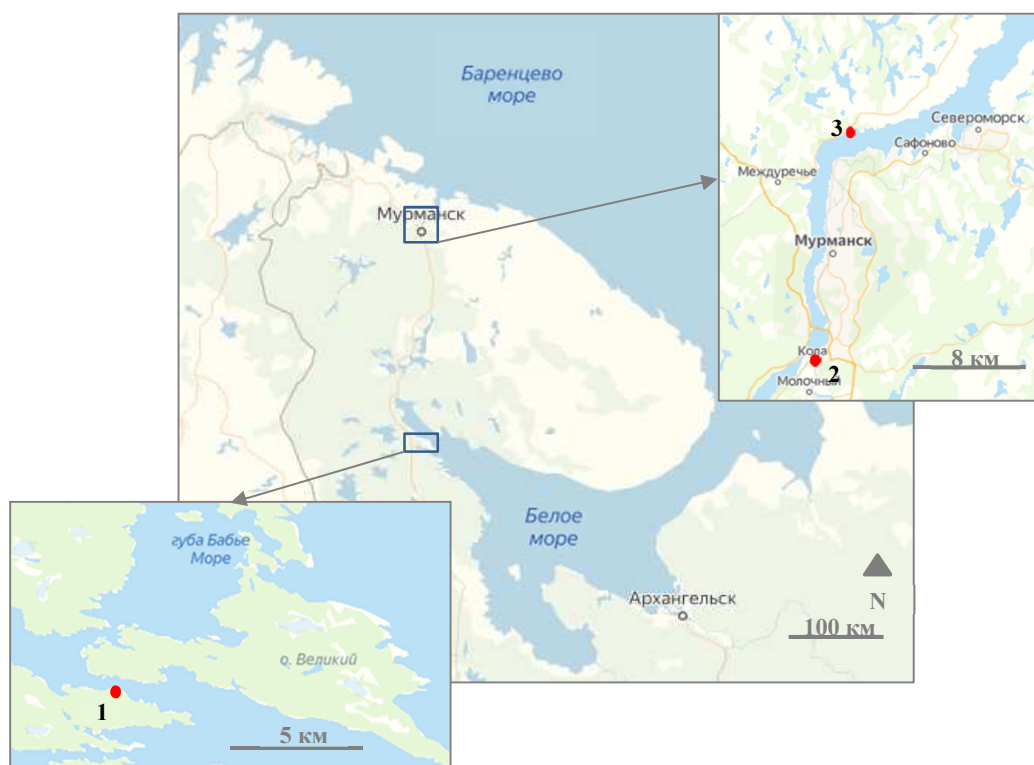


Рис. 1. Районы отбора проб: 1 – БС; 2 – г. Кола; 3 – пос. Белокаменка. Источник https://yandex.ru/maps/?ll=36.699135%2C67.569475&pt=36.699135%2C67.569365&source=entity_search&z=6
Fig. 1. Sampling areas: 1 – the Belomorsk biological station; 2 – Kola, the town; 3 – Belokamenka, the settlement

Таблица 1. Содержание нефтяных углеводородов в прибрежных субстратах Белого и Баренцева морей
Table 1. Content of petroleum hydrocarbons in the coastal substrates of the White and Barents Seas

Содержание нефтяных углеводородов	Субстрат	Исследуемый участок			ПДК
		БС	Белокаменка	Кола	
мг/кг	Прибрежная почва	–	839	22 730	1 000
	Грунт (литораль)	–	285	1 122	
мг/дм ³	Вода	0,03–0,04	0,038	0,32	0,05

Культивирование и идентификация микромицетов

Водные и почвенные образцы отбирали стерильно в 3–5-кратной повторностях по стандартным методикам¹ (Звягинцев, 1991) для микологического анализа. Выявление и учет численности углеводородокисляющих микромицетов проводили методом предельных разведений почвенной суспензии с последующим глубинным посевом на агаризованную питательную среду Чапека – Докса следующего состава (г/л): NaNO₃ – 3,0; KH₂PO₄ – 1,0; MgSO₄ – 0,5; KCl – 0,5; FeSO₄ – 0,01, агар-агар – 18,0, дистиллированная вода – 1 л. Для приготовления почвенной суспензии навеску почвы с учетом влажности растворяли в воде, из полученной смеси готовили суспензии до второго 10⁻² (песок) и третьего 10⁻³ (почвогрунты) разведения. Водные пробы анализировали без разведения. В качестве единственного источника углерода добавляли нефть в концентрации 1 % по объему. Каждый исследуемый образец анализировали в трех повторностях. Чашки Петри с высеянным материалом инкубировали в течение 10 дней при температуре 27 °С. По окончании инкубирования выросшие изоляты выделяли в чистую культуру на агаризованную среду Чапека – Докса и сусло-агар. Идентификацию грибов выполняли с использованием светового микроскопа Olympus CX41 (Япония) на основе культурально-морфологических признаков по определителям российских и зарубежных авторов (Егорова, 1986; Klich, 2002; Domsch et al., 2007), названия таксонов унифицировали с использованием базы данных Index Fungorum (www.indexfungorum.org).

¹ ГОСТ 31861-2012. Межгосударственный стандарт. Вода. Общие требования к отбору проб. М., 2012; Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в почвах и донных отложениях методом ИК-спектрии: ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. М., 1998. 15 с.

Для ряда видов идентификацию осуществляли на основании анализа участка рибосомальных генов ITS1–5.8S–ITS2 рДНК. Выделение ДНК проводили по методике (Archaea, 2007). Секвенирование участков ДНК делали с помощью набора реактивов BigDye Terminator V. 3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, USA) с последующим анализом продуктов реакции на секвенаторе Applied Biosystems 3130I Genetic Analyzer в научно-производственном центре "Синтол" (г. Москва).

Характеристика микромицетов

Проанализирована нефтедеструкционная активность 33 штаммов микромицетов (табл. 2). Наибольшее количество исследуемых видов относилось к роду *Penicillium* – 12 видов. Роды *Tolypocladium* и *Trichoderma* представлены тремя видами, *Acremonium*, *Aspergillus*, *Oidiodendron*, *Sarocladium*, *Talaromyces* – двумя видами. Грибы родов *Meyerozyma*, *Paradendryphiella*, *Pseudogymnoascus*, *Umbelopsis* представлены одним видом. Все исследуемые грибы относились к отделу *Ascomycota*, за исключением *Umbelopsis ramanniana*. Данный вид является представителем отдела *Mucoromycota*.

Таблица 2. Микромицеты, исследуемые на углеводородокисляющую активность
Table 2. Micromycetes tested for hydrocarbon-oxidizing activity

Вид	Местообитание	
	Белое море	Баренцево море
<i>Acremonium sp. st.2</i>		+*
<i>Acremonium tubakii</i> W. Gams	+	
<i>Aspergillus flavus</i> Link		+**
<i>A. sydowii</i> (Bainier & Sartory) Thom & Church	+	
<i>Meyerozyma guilliermondii</i> (Wick.) Kurtzman & M. Suzuki	+	
<i>Oidiodendron periconioides st.1</i> Morrall	+	
<i>O. periconioides st.2</i> Morrall	+	
<i>Paradendryphiella salina</i> (G.K. Sutherl.) Woudenb. & Crous	+	
<i>Penicillium camemberti</i> Thom		+**
<i>P. canescens</i> Sopp st.1		+**
<i>P. canescens</i> Sopp st.2 (= <i>P. raciborskii</i>)		+*
<i>P. chrysogenum</i> Thom		+*
<i>P. corylophilum</i> Dierckx		+**
<i>P. dipodomyus</i> (Frisvad, Filt. & Wicklow) Banke, Frisvad & S. Rosend.	+	
<i>P. roseopurpureum</i> Dierckx	+	
<i>P. simplicissimum</i> (Oudem.) Thom (= <i>P. janthinellum</i>)		+**
<i>P. solitum</i> Westling	+	
<i>Penicillium sp. st.1</i>	+	
<i>Penicillium sp. st.2</i>	+	
<i>P. thomii</i> Maire	+	
<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D. L. Lindner	+	
<i>Sarocladium strictum</i> (W. Gams) Summerb.	+	
<i>S. terricola</i> (J. H. Mill., Giddens & A. A. Foster) A. Giraldo, Gené & Guarro		+*
<i>Talaromyces diversus</i> (Raper & Fennell) Samson, N. Yilmaz & Frisvad	+	
<i>T. variabilis</i> (Sopp) Samson, N. Yilmaz, Frisvad & Seifert	+	
<i>Tolypocladium cylindrosporum</i> W. Gams	+	
<i>T. inflatum st.1</i> W. Gams	+	
<i>T. inflatum st.2</i> W. Gams	+	
<i>T. tundrense</i> Bissett	+	
<i>Trichoderma aureoviride</i> Rifai	+	
<i>T. minutisporum</i> Bissett	+	
<i>T. polysporum</i> (Link) Rifai	+	
<i>Umbelopsis ramanniana</i> (Möller) W. Gams	+	

Примечание. * – г. Кола, ** – пос. Белокаменка.

Лабораторный эксперимент

Эксперимент проводили в два этапа. На первом этапе работы продолжительность опыта составляла 14 суток. Изначально проводили смыв чистых культур микромицетов в колбы Эрленмейера с питательной средой Чапека без сахарозы. Для этого добавляли грибную суспензию с титром 10^6 – 10^7 КОЕ/мл в 50 мл питательной среды. В качестве источника углерода вносили нефть в концентрации 1 % по объему.

Контролем служила стерильная среда с нефтью без микромицетов. Повторность опыта – трехкратная. Культивирование грибов проводили при температуре 27 °С. Спустя 14 или 28 суток определяли биомассу микроскопических грибов, высушивая ее при 105 °С до абсолютно сухой массы. Остаточную концентрацию НП в среде определяли на анализаторе АН-2 (г. Санкт-Петербург) методом инфракрасной спектрометрии, основанном на выделении эмульгированных и растворенных нефтяных компонентов из жидкой среды экстракцией четыреххлористым углеродом (CCl₄), хроматографическом отделении НП от сопутствующих органических соединений других классов на колонке, заполненной оксидом алюминия, и количественном их определении по интенсивности поглощения С–Н связей, метиленовых (–CH₂–) и метильных (–CH₃) групп в инфракрасной области спектра².

На втором этапе работы продолжительность опыта составляла 28 суток. В ходе этого этапа изучали нефтедеструкционный потенциал морских штаммов микромицетов, являющихся редко встречающимися видами в зональных почвах Кольского полуострова.

Результаты и обсуждение

Нефтедеструкционная активность микромицетов в течение 14 суток

Известно, что в первое время после загрязнения существенное снижение содержания НП в среде происходит за счет испарения легких фракций нефти. Например, с водной поверхности углеводороды легкой фракции нефти улетучиваются в течение 10 суток, углеводороды средней фракции удерживаются намного дольше, а компоненты тяжелой фракции нефти практически не испаряются (Немировская, 2013). Так, за счет испарения может деградировать до 10 % тяжелой и до 75 % легкой нефти (Давыдова и др., 2004; Macaulay, 2015). В нашем эксперименте за счет испарения разлагалось от 32 до 43 % углеводородов, что согласуется с литературными данными (Другов и др., 2007).

Установлено, что микромицеты обладают разной нефтедеструкционной способностью. Снижение содержания УН в жидкой среде для 33 тестируемых штаммов спустя 14 суток составило от 11 до 83 % (рис. 2).

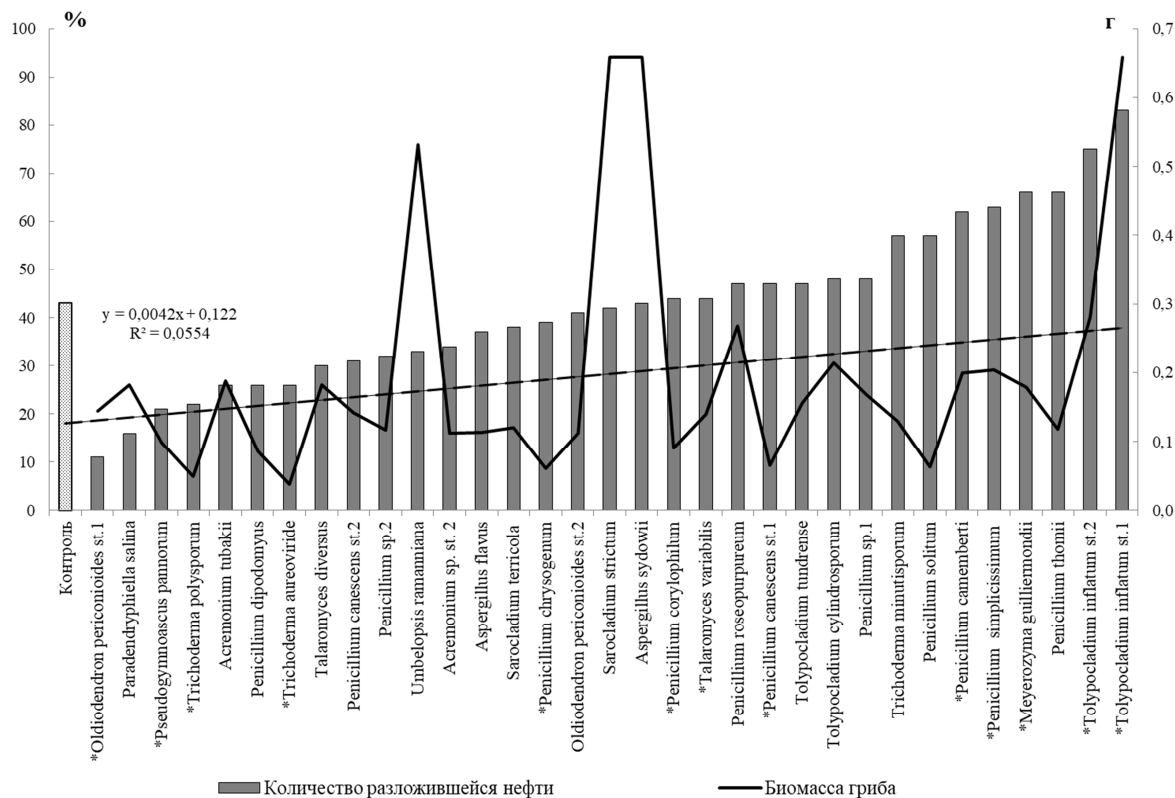


Рис. 2. Убыль нефтепродуктов в питательной среде за 14 суток инкубации. Звездочкой отмечено статистически достоверное снижение концентрации нефтепродуктов грибами ($p = 0,05$; $df = 4$; $t = 2,78$)

Fig. 2. Decrease of oil products in the nutrient media for 14 days of incubation. A statistically significant decrease in the concentration of oil products by fungi is marked with an asterisk ($p = 0,05$; $df = 4$; $t = 2,78$)

² Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии: ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. М., 1998. 15 с.

Ранее коллегами (Чаноргина и др., 2019) разработана шкала деструкционной активности микроскопических грибов к УН за 14 суток, согласно которой микромицеты разделены на три группы: I – виды с высокой активностью, снижающие содержание нефти в среде на 80–98 %; II – виды со средней активностью, снижающие содержание нефти в среде на 50–79 %; III – виды с низкой активностью, снижающие содержание нефти в среде на 49 % и менее.

Согласно данной шкале высокой деструкционной активностью обладал один штамм *Tolypocladium inflatum* st.1, достоверно снижающий содержание НП в среде на 83 % от исходного содержания НП, из которых на долю биологической деструкции пришлось 40 %.

Средней деструкционной активностью обладали семь штаммов *T. inflatum* st.2, *Penicillium thomii*, *Meyerozyma guilliermondii*, *Penicillium simplicissimum*, *P. camemberti*, *P. solitum* и *Trichoderma minutisporum*, снижающие содержание НП в среде на 57–75 %. Работы других авторов (Atlas, 1981; Zheng et al., 2003; Husaini et al., 2008; Leitão, 2009; Zhang et al., 2017; Govarthanam et al., 2017; Park et al., 2019; Serra et al., 2019; Vasconcelos et al., 2019; Zajc et al., 2019; Чаноргина и др., 2019) подтверждают, что вышеуказанные роды микромицетов способны участвовать в биоразложении нефти и НП. Следовательно, эти исследуемые грибы можно считать устойчивыми к нефтяному загрязнению.

Грибы *Penicillium simplicissimum* и *P. camemberti* выделены из прибрежных территорий п. Белокаменка Кольского залива Баренцева моря, остальные активные микромицеты-нефтедеструкторы обнаружены в Кандалакшском заливе Белого моря. Важно отметить, что эти грибы выделены из относительно чистых в отношении нефтезагрязнения участков, в которых содержание УН не превышало уровня ПДК. Это указывает на то, что микроорганизмы с высокой углеводородоксилирующей способностью могут обитать и в незагрязненных НП природных средах.

Существуют литературные данные, что вышеперечисленные микромицеты наряду с другими компонентами нефти способны разлагать ПАУ. Полициклические ароматические углеводороды считаются повсеместно распространенными, токсичными и мутагенными приоритетными поллютантами окружающей среды (Husaini et al., 2008; Leitão, 2009). Так, грибы морского происхождения *Tolypocladium sp.* являются подходящим генетическим ресурсом для биоремедиации засоленных сред и способны разлагать пирен и бензапирен. Установлено, что деградация пирена отдельными штаммами *Tolypocladium sp.* в модельном опыте за 7 дней составляла в соленой среде от 0 до 58 %, т. е. способность утилизировать углеводороды является свойством отдельных штаммов, а не видов. В незасоленной среде убыль пирена этим микромицетом составляла 65 % и бензаперена – 63 % (Vasconcelos et al., 2019).

Эндофитный гриб (Nakayan et al., 2013; Chen et al., 2015; Ravuri et al., 2020) *Meyerozyma guilliermondii* также является типичным морским представителем и часто обнаруживается в дрожжевой форме (по нашим наблюдениям). Способен разлагать как азотсодержащие углеводороды (3-гидроксипропионитрил, бензонитрил, циклогексан-карбонитрил) (Zhang et al., 2017; Serra et al., 2019), так и алифатические углеводороды (*n*-гексадекан) (Zajc et al., 2019).

Некоторые виды *Trichoderma* также рассматривают в качестве потенциальных агентов биоремедиации в почве (Tripathi et al., 2013), подверженной воздействию ПАУ, что связано со способностью грибов этого рода метаболизировать различные соединения как с высокой, так и с низкой молекулярной массой (нафталин, фенантрен, хризен, пирен и бензапирен) (Zafra et al., 2015).

В мероприятиях по биоремедиации используют и разнообразные виды рода *Penicillium* (Sinclair et al., 1975; Park et al., 2019; Чаноргина и др., 2019), которые могут быть потенциально интересны для разработки технологий очистки природных сред от загрязняющих веществ (Leitão, 2009; Ghanbari et al., 2014; Maamar et al., 2020).

По данным нашего эксперимента, остальные 25 видов обладали низкой нефтедеструкционной активностью ниже 48 % (рис. 1). У трети видов остаточная концентрация в среде была на уровне испарения. Ряд штаммов *Oidiodendron periconioides* st.1, *Pseudogymnoascus pannorum*, *Trichoderma polysporum*, *Acremonium tubakii*, *Penicillium dipodomyus*, *Trichoderma aureoviride* снижали содержание УН в среде на 11–26 %. Эти грибы являются чувствительными к нефтяному загрязнению, и в процессах активного биоразложения нефти и НП они, скорее всего, не способны участвовать.

Важным показателем в механизмах самоочищения природных сред является не только остаточное содержание УН, но также и рост биомассы грибов в условиях нефтезагрязнения. В нашем исследовании при данной величине выборки ($p = 0,05$; $df = 4$; $t = 2,78$) не было выявлено достоверной корреляционной связи между степенью разложения НП и биомассой микроскопических грибов ($r = 0,3$). Наибольшая грибная биомасса была отмечена у штаммов *Tolypocladium inflatum* st.1, *T. inflatum* st.2, *Aspergillus sydowii*, *Sarocladium strictum*, *Umbelopsis ramanniana*. Однако в отличие от первых двух последние три вида микромицетов не проявили заметной нефтедеструктивной активности (рис. 2).

Как правило, микроорганизмы нуждаются в подходящих условиях роста, в качестве которых могут выступать питательные вещества (субстраты) и биогенные элементы, температура, pH, окислительно-восстановительный потенциал, содержание кислорода. Перечисленные показатели сильно влияют на рост и развитие микробиоты (Csutak et al., 2010; Govarthanam et al., 2017) в условиях нефтезагрязнения. Возможно,

в нашем случае низкие значения биомассы микромицетов можно объяснить именно недостатком питательных веществ, недостаточной аэрацией среды, а также токсическим эффектом нефти на тестируемые штаммы.

Нефтедеструкционная активность микромицетов в течение 28 суток

Процесс естественного восстановления загрязненных НП природных сред длителен по времени, каждый отдельный микроорганизм (в том числе его штаммы) способен метаболизировать УН с характерной для него скоростью. Поэтому мы проверили степень разложения НП некоторыми морскими микромицетами-нефтедеструкторами в жидкой среде за более длительный период времени.

В результате опыта по изучению нефтедеструктивной способности микромицетов за 28 суток практически у всех видов не было выявлено существенных изменений в содержании УН в среде по сравнению с 14-дневным периодом, за исключением штамма *Tolypocladium cylindrosporum* (рис. 3). В этом варианте за первые 14 суток инкубирования количество УН снизилось на 48 %, а в последующие 14 суток достигло уровня 95 % разложения от исходного содержания нефтепродуктов, из которых на долю биологической деструкции пришлось 32 %.

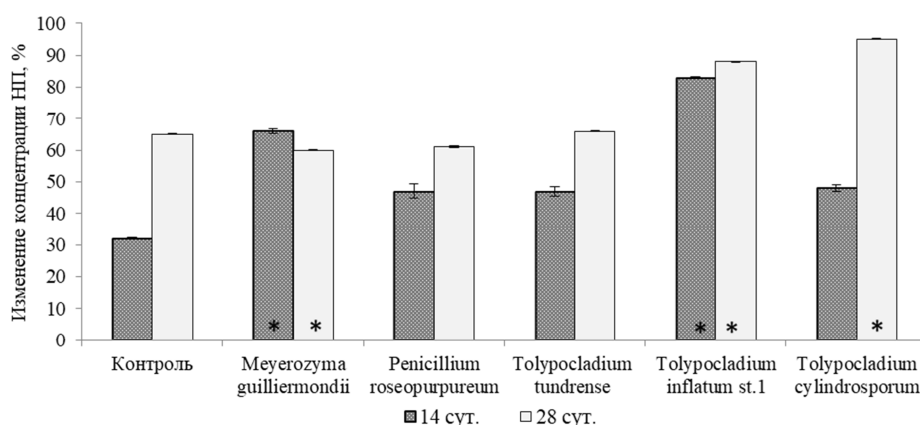


Рис. 3. Убыль нефтепродуктов в среде через 14 и 28 суток инкубации некоторыми штаммами грибов. Звездочкой отмечено статистически достоверное снижение концентрации НП грибами ($p = 0,05$; $df = 4$; $t = 2,78$)

Fig. 3. Decrease of oil products in the medium after 14 and 28 days of incubation with some strains of fungi. A statistically significant decrease in the concentration of oil products by fungi is marked with an asterisk ($p = 0,05$; $df = 4$; $t = 2,78$)

Следует также отметить, что в контрольном варианте за счет испарения в течение 28 суток разложилось в два раза больше НП, чем за 14-дневный период (63 % относительно 32 % НП).

Результаты опыта свидетельствуют о том, что наиболее активно деструкция НП происходит в течение 10–15 суток с момента внесения нефти в жидкую среду с грибной культурой. Это необходимо учитывать при планировании восстановительных мероприятий окружающей среды при аварийных нефтяных разливах. Принимая во внимание факт, что первостепенно процессам испарения и микробиологической деструкции поддаются легкие фракции нефти, можно предположить, что остальные компоненты, относящиеся к средним и тяжелым фракциям, в морской среде в дальнейшем либо осядут на дно, либо мигрируют водными массами, либо уже более медленными темпами будут подвергаться микробиальным метаболическим превращениям (Немировская, 2013; Ossai et al., 2020).

Однако чтобы иметь полное представление о накоплении, детоксикации, трансформации и минерализации УН микроскопическими грибами, необходимы дальнейшие исследования для определения физиологических, биохимических и молекулярных механизмов устойчивости микромицетов в условиях нефтезагрязнения.

Заключение

Таким образом, анализ нефтедеструкционной способности 33 штаммов микроскопических грибов, выделенных из прибрежных территорий Белого и Баренцева морей, показал, что микромицеты обладают разной активностью к деградации нефти. Среди них есть как чувствительные, так и толерантные к нефтезагрязнению виды. Наибольшей нефтедеструктивной активностью обладали штаммы *Tolypocladium inflatum st.1*, *T. inflatum st.2*, *Penicillium thomii*, *Meyerozyma guilliermondii*, *Penicillium simplicissimum*, *P. camemberti*, *P. solitum* и *Trichoderma minutisporum*, снижение концентрации НП этими грибами составило 57–83 %. Наиболее активно деструкция УН микромицетами в лабораторном эксперименте проходила

в течение 14 суток с момента внесения нефти в жидкую среду с грибной культурой. Некоторые представители микроскопических грибов в окислении УН могут участвовать более длительный период: *Tolypocladium cylindrosporum* снижал содержание УН за 28 суток на 95 %.

Четкой связи между грибной биомассой и степенью разложения НП не выявлено, однако толерантные виды микромицетов, существенно не увеличивая своей биомассы, способны активно разлагать УН.

Выявленные активные штаммы нефтеокисляющих микромицетов могут быть использованы для создания биопрепаратов с перспективой их дальнейшего применения для биоремедиации при нефтяных разливах в северных морских экосистемах.

Благодарности

Проведение полевых работ выполнено за счет проекта Коларктик КО1001. Постановку лабораторного эксперимента осуществляли в рамках темы НИР по госзаданию АААА-А18-118021490070-5. Обобщение полученных результатов и подготовка рукописи статьи выполнены в рамках темы НИР по госзаданию 0186-2019-0009. Авторы выражают благодарность кандидату биологических наук, заведующему лабораторией экологии микроорганизмов ИППЭС КНЦ РАН Мязину Владимиру Александровичу за помощь в организации и проведении полевых работ, а также за помощь в освоении метода по определению содержания нефтепродуктов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Давыдова С. Л., Тагасов В. И. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде. М. : Изд-во РУДН, 2004. 163 с.
- Донерьян Л. Г., Водянова М. А., Тарасова Ж. Е. Микроскопические почвенные грибы – организмы-биоиндикаторы нефтезагрязненных почв // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95, № 9. С. 891–894. DOI: <http://dx.doi.org/10.1882/0016-9900-2016-9-891-894>.
- Другов Ю. С., Родин А. А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов : практическое руководство. М. : Лаборатория знаний, 2007. 270 с.
- Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Корнейкова М. В., Ахтулова Е. М. [и др.]. Воздействие загрязнения почв дизельным топливом на растения и ризосферную микробиоту на Кольском Севере // Агрохимия. 2007. № 12. С. 49–55.
- Егорова Л. Н. Почвенные грибы Дальнего Востока. Гифомицеты. Ленинград : Наука, 1986. 192 с.
- Зволинский В. П., Батовская Е. К., Туманян А. Ф. Влияние нефтяного загрязнения на микробиологическую активность почв // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2010. № 4. С. 39–44.
- Звягинцев Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М. : Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
- Климовский Н. В. Содержание и распределение нефтяных углеводородов в водах Белого моря в весенне-летний период 2010–2015 гг. // Изучение, рациональное использование и охрана природных ресурсов Белого моря : материалы XIII Всерос. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 17–20 октября 2017 г. СПб., 2017. С. 280–282.
- Кузнецов А. Е., Градова Н. Б., Лушников С. В., Энгельхарт М. [и др.]. Прикладная экобиотехнология. В 2 т. Т. 2. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний. 2017. 485 с.
- Немировская И. А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки) / под ред. А. П. Лисицына. М. : Научный мир, 2013. 432 с.
- Немировская И. А., Реджепова З. Ю., Титова А. М., Медведева А. В. Происхождение углеводородов в различных сферах Белого моря // Изучение, рациональное использование и охрана природных ресурсов Белого моря: материалы XIII Всерос. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 17–20 октября 2017 г. СПб., 2017. С. 146–149.
- Тетельмин В. В., Язев В. А. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. Долгопрудный : ИД "Интеллект", 2013. 352 с.
- Чапоргина А. А., Корнейкова М. В., Фокина Н. В. Деструкционная активность углеводородоокисляющих микромицетов, выделенных из почв Кольского полуострова // Микология и фитопатология. 2019. Т. 53, № 1. С. 36–45. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0026364819010057>.
- Шапиро Т. Н., Дольникова Г. А., Немцева Н. В., Санджиева Д. А. [и др.]. Идентификация и физиологическая характеристика консорциума углеводородоокисляющих бактерий нефти и нефтепродуктов // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2018. № 4. С. 107–113. DOI: <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2018-4-107-113>.
- Al-Nasrawi H. Biodegradation of crude oil by fungi isolated from Gulf of Mexico // Journal of Bioremediation and Biodegradation. 2012. Vol. 3, Iss. 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2155-6199.1000147>.

- Archaea. Evolution, physiology, and molecular biology / eds.: R. A. Garrett, H.-P. Klenk. Blackwell Publishing Ltd, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470750865>.
- Atlas R. M. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective // Microbiological reviews. 1981. Vol. 45, Iss. 1. P. 180–209. DOI: <https://doi.org/10.1128/mr.45.1.180-209.1981>.
- Chen S., Liu Z., Liu Y., Lu Y. [et al.]. New depsidones and isoindolinones from the mangrove endophytic fungus *Meyerozyma guilliermondii* (HZ-Y2) isolated from the South China Sea // Beilstein Journal of Organic Chemistry. 2015. Vol. 11. P. 1187–1193. DOI: <https://doi.org/10.3762/bjoc.11.133>.
- Csutak O., Stoica I., Ghindea R., Tanase A.-M. [et al.]. Insights on yeast bioremediation processes // Romanian Biotechnological Letters. 2010. Vol. 15. P. 5066–5071.
- Domsch K. H., Gams W., Anderson T.-H. Compendium of soil fungi. IHW-Verlag, Eching, 2007.
- Finley S. D., Broadbelt L. J., Hatzimanikatis V. In silico feasibility of novel biodegradation pathways for 1, 2, 4-trichlorobenzene // BMC Systems Biology. 2010. Vol. 4. DOI: <https://doi.org/10.1186/1752-0509-4-7>. (Article number: 7)
- Ghanbari T., Mohammadkhani H. S., Babaeizad V. Identification of some secondary metabolites produced by four *Penicillium* species // Mycologia Iranica. 2014. Vol. 1, Iss. 2. P. 107–113.
- Govarthanan M., Fuzisawa S., Hosogai T., Chang Y.-C. Biodegradation of aliphatic and aromatic hydrocarbons using the filamentous fungus *Penicillium* sp. CHY-2 and characterization of its manganese peroxidase activity // RSC advances. 2017. Vol. 7, Iss. 34. P. 20716–20723. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6ra28687a>.
- Husaini A., Roslan H. A., Hii K. S. Y., Ang C. Y. Biodegradation of aliphatic hydrocarbon by indigenous fungi isolated from used motor oil contaminated sites // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2008. Vol. 24, Iss. 12. P. 2789–2797. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9806-3>.
- Klich M. A. Identification of common *Aspergillus* species. Utrecht, The Netherlands, 2002.
- Kumar R., Kaur A. Oil spill removal by mycoremediation // Microbial Action on Hydrocarbons / eds. V. Kumar et al. Springer, Singapore, 2018. P. 505–526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1840-5_20.
- Lebkowska M., Karwowska E., Miaskiewicz E. Isolation and identification of bacteria from petroleum derivatives contaminated soil // Acta Microbiologica Polonica. 1995. Vol. 44, Iss. 3–4. P. 297–303.
- Leitão A. L. Potential of *Penicillium* species in the bioremediation field // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2009. Vol. 6, Iss. 4. P. 1393–1417. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph6041393>.
- Maamar A., Lucchesi M.-E., Debaets S., Nguyen van Long N. [et al.]. Highlighting the crude oil bioremediation potential of marine fungi isolated from the port of Oran (Algeria) // Diversity. 2020. Vol. 12, Iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/d12050196>.
- Macaulay B. M. Understanding the behaviour of oil-degrading microorganisms to enhance the microbial remediation of spilled petroleum // Applied Ecology and Environmental Research. 2015. Vol. 13, Iss. 1. P. 247–262. DOI: https://doi.org/10.15666/aeer/1301_247262.
- Nakayan P., Hameed A., Singh S., Young L.-S. [et al.]. Phosphate-solubilizing soil yeast *Meyerozyma guilliermondii* CC1 improves maize (*Zea mays* L.) productivity and minimizes requisite chemical fertilization // Plant and Soil. 2013. Vol. 373. P. 301–315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1792-z>.
- Ossai I. C., Ahmed A., Hassan A., Hamid F. S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review // Environmental Technology & Innovation. 2020. Vol. 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>. (Article number: 100526)
- Park M. S., Oh S.-Y., Fong J. J., Houbraken J. [et al.]. The diversity and ecological roles of *Penicillium* in intertidal zones // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49966-5>. (Article number: 13540).
- Raghukumar S. Fungi in coastal and oceanic marine ecosystems. Springer, Cham, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54304-8>.
- Ravuri M., Shivakumar S. Optimization of conditions for production of lovastatin, a cholesterol lowering agent, from a novel endophytic producer *Meyerozyma guilliermondii* // Journal of Biologically Active Products from Nature. 2020. Vol. 10, Iss. 3. P. 192–203. DOI: <https://doi.org/10.1080/22311866.2020.1768147>.
- Serra I., Capusoni C., Molinari F., Musso L. [et al.]. Marine microorganisms for biocatalysis: Selective hydrolysis of nitriles with a salt-resistant strain of *Meyerozyma guilliermondii* // Marine Biotechnology. 2019. Vol. 21, Iss. 2. P. 229–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10126-019-09875-0>.
- Sinclair N. A., Herring C. M. Isolation of *Penicillium corylophilum* Dierckx from acid mine water and its optimal growth on hydrocarbons at acid pH // Mycopathologia. 1975. Vol. 57, Iss. 1. P. 19–22. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00431172>.
- Singh H. Mycoremediation. Fungal bioremediation. Hoboken: Wiley, 2006. 592 p.
- Tripathi P., Singh P. C., Mishra A., Chauhan P. S. [et al.]. *Trichoderma*: A potential bioremediator for environmental clean-up // Clean Technologies and Environmental Policy. 2013. Vol. 15, Iss. 4. P. 541–550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0553-7>.

- Vasconcelos M. R., Vieira G. A., Otero I. V., Bonugli-Santos R. C. [et al.]. Pyrene degradation by marine-derived ascomycete: Process optimization, toxicity, and metabolic analyses // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26, Iss. 12. P. 12412–12424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04518-2>.
- Zafra G., Cortés-Espinosa D. V. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Trichoderma* species: A mini review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 22, Iss. 24. P. 19426–19433. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5602-4>.
- Zajc J., Gostinčar C., Černoša A., Gunde-Cimerman N. Stress-tolerant yeasts: Opportunistic pathogenicity versus biocontrol potential // *Genes*. 2019. Vol. 10, Iss. 1. № 42. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes10010042>.
- Zhang Q., Gong J.-S., Dong T.-T., Liu T.-T. [et al.]. Nitrile-hydrolyzing enzyme from *Meyerozyma guilliermondii* and its potential in biosynthesis of 3-hydroxypropionic acid // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 40, Iss. 6. P. 901–910. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1754-6>.
- Zheng Z., Obbard J. P. Oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fungal isolates from an oil contaminated refinery soil // *Environmental Science and Pollution Research*. 2003. Vol. 10, Iss. 3. P. 173–176. DOI: <https://doi.org/10.1065/espr2002.07.126>.

References

- Davydova, S. L., Tagasov, V. I. 2004. Oil and petroleum products in the environment. Moscow. (In Russ.)
- Doneryan, L. G., Vodyanova, M. A., Tarasova, Zh. E. 2016. Microscopic soil fungi – organisms-bioindicators of oil-contaminated soils. *Hygiene and Sanitation*, 95(9), pp. 891–894. DOI: <http://dx.doi.org/10.1882/0016-9900-2016-9-891-894>. (In Russ.)
- Drugov, Yu. S., Rodin, A. A. 2007. Environmental analyses for oil spills and oil products. Moscow. (In Russ.)
- Evdokimova, G. A., Mozgova, N. P., Korneykova, M. V., Akhtulova, E. M. et al. 2007. Impact of soil contamination by diesel fuel on plants and rhizosphere microbiota in the Kola North. *Eurasian Soil Science*, 12, pp. 49–55. (In Russ.)
- Egorova, L. N. 1986. Soil fungi of the Far East. Hyphomycetes. Leningrad. (In Russ.)
- Zvolinskiy, V. P., Batovskaya, E. K., Tumanyan, A. F. 2010. Influence of oil pollution on microbiological soil activity. *Theoretical & Applied Problems of Agro-Industry*, 4, pp. 39–44. (In Russ.)
- Zvyagintsev, D. G. 1991. Methods of soil microbiology and biochemistry. Moscow. (In Russ.)
- Klimovskiy, N. V. 2017. Content and distribution of petroleum hydrocarbons in the waters of the White Sea in the spring – summer period, 2010–2015. Proceedings of Intern. XIII conf. *Study, rational use and protection of natural resources of the White Sea*, 17–20 October, 2017. St. Petersburg, pp. 280–282. (In Russ.)
- Kuznetsov, A. E., Gradova, N. B., Lushnikov, S. V., Engelkhart, M. et al. 2017. Applied Ecobiotechnology. Moscow. (In Russ.)
- Nemirovskaya, I. A. 2013. Oil in the ocean (pollution and natural flow). Ed. A. P. Lisitzin. Moscow. (In Russ.)
- Nemirovskaya, I. A., Redzhepova, Z. Yu., Titova, A. M., Medvedeva, A. V. 2017. The origin of hydrocarbons in various areas of the White Sea. Proceedings of Intern. XIII conf. *Study, rational use and protection of natural resources of the White Sea*, 17–20 October, 2017. St. Petersburg, pp. 146–149. (In Russ.)
- Tetelmin, V. V., Yazev, V. A. 2013. Environmental protection in the oil and gas complex. *Dolgoprudnyy*. (In Russ.)
- Chaporgina, A. A., Korneykova, M. B., Fokina, N. B. 2019. The destructive activity of hydrocarbon-oxidizing micromycetes isolated from soils of the Kola Peninsula. *Mycology and Phytopathology*, 53(1), pp. 36–45. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0026364819010057>. (In Russ.)
- Shapiro, T. N., Dolnikova, G. A., Nemtseva, N. V., Sandzhieva, D. A. et al. 2018. Identification and physiological characteristics of hydrocarbon-oxidizing bacteria consortium of oil and petroleum oil products. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*, 4, pp. 107–113. DOI: <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2018-4-107-113>. (In Russ.)
- AL-Nasrawi, H. 2012. Biodegradation of crude oil by fungi isolated from Gulf of Mexico. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 3(4), pp. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2155-6199.1000147>.
- Archaea. Evolution, physiology, and molecular biology. 2007. Eds.: R. A. Garrett, H.-P. Klenk. Blackwell Publishing Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470750865>.
- Atlas, R. M. 1981. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective. *Microbiological Reviews*, 45(1), pp. 180–209.
- Chen, S., Liu, Z., Liu, Y., Lu, Y. et al. 2015. New depsidones and isoindolinones from the mangrove endophytic fungus *Meyerozyma guilliermondii* (HZ-Y2) isolated from the South China Sea. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 11(1), pp. 1187–1193. DOI: <https://doi.org/10.3762/bjoc.11.133>.
- Csutak, O., Stoica, I., Ghindea, R., Tanase, A.-M. et al. 2010. Insights on yeast bioremediation processes. *Romanian Biotechnological Letters*, 15(2), pp. 5066–5071.
- Domsch, K. H., Gams, W., Anderson, T.-H. 2007. Compendium of soil fungi. IHW-Verlag, Eching.
- Finley, S. D., Broadbelt, L. J., Hatzimanikatis, V. 2010. In silico feasibility of novel biodegradation pathways for 1, 2, 4-trichlorobenzene. *BMC Systems Biology*, 4. DOI: <https://doi.org/10.1186/1752-0509-4-7>. (Article number: 7)

- Ghanbari, T., Mohammadkhani, H. S., Babaeizad, V. 2014. Identification of some secondary metabolites produced by four *Penicillium* species. *Mycologia Iranica*, 1(2), pp. 107–113.
- Govarathanan, M., Fuzisawa, S., Hosogai, T., Chang, Y.-C. 2017. Biodegradation of aliphatic and aromatic hydrocarbons using the filamentous fungus *Penicillium sp.* CHY-2 and characterization of its manganese peroxidase activity. *RSC Advances*, 7(34), pp. 20716–20723. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6ra28687a>.
- Husaini, A., Roslan, H. A., Hii, K. S. Y., Ang, C. Y. 2008. Biodegradation of aliphatic hydrocarbon by indigenous fungi isolated from used motor oil contaminated sites. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(12), pp. 2789–2797. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9806-3>.
- Klich, M. A. 2002. Identification of common *Aspergillus* species. Utrecht, The Netherlands.
- Kumar, R., Kaur, A. 2018. Oil spill removal by mycoremediation. In *Microbial Action on Hydrocarbons*, eds. V. Kumar et al. Springer, Singapore, pp. 505–526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1840-5_20.
- Lebkowska, M., Karwowska, E., Miaskiewicz, E. 1995. Isolation and identification of bacteria from petroleum derivatives contaminated soil. *Acta Microbiologica Polonica*, 44(3–4), pp. 297–303.
- Leitão, A. L. 2009. Potential of *Penicillium* species in the bioremediation field. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6(4), pp. 1393–1417. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph6041393>.
- Maamar, A., Lucchesi, M.-E., Debaets, S., Nguyen van Long, N. et al. 2020. Highlighting the crude oil bioremediation potential of marine fungi isolated from the port of Oran (Algeria). *Diversity*, 12(5). DOI: <https://doi.org/10.3390/d12050196>.
- Macaulay, B. M. 2015. Understanding the behaviour of oil-degrading microorganisms to enhance the microbial remediation of spilled petroleum. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1), pp. 247–262. DOI: https://doi.org/10.15666/aeer/1301_247262.
- Nakayan, P., Hameed, A., Singh, S., Young, L.-S. et al. 2013. Phosphate-solubilizing soil yeast *Meyerozyma guilliermondii* CC1 improves maize (*Zea mays L.*) productivity and minimizes requisite chemical fertilization. *Plant and Soil*, 373, pp. 301–315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1792-z>.
- Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., Hamid, F. S. 2020. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>. (Article number: 100526)
- Park, M. S., Oh, S.-Y., Fong, J. J., Houbraken, J. et al. 2019. The diversity and ecological roles of *Penicillium* in intertidal zones. *Scientific Reports*, 9. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49966-5>. (Article number: 13540).
- Raghukumar, S. 2017. Fungi in coastal and oceanic marine ecosystems. Springer, Cham. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54304-8>.
- Ravuri, M., Shivakumar, S. 2020. Optimization of conditions for production of lovastatin, a cholesterol lowering agent, from a novel endophytic producer *Meyerozyma guilliermondii*. *Journal of Biologically Active Products from Nature*, 10(3), pp. 192–203. DOI: <https://doi.org/10.1080/22311866.2020.1768147>.
- Serra, I., Capusoni, C., Molinari, F., Musso, L. et al. 2019. Marine microorganisms for biocatalysis: Selective hydrolysis of nitriles with a salt-resistant strain of *Meyerozyma guilliermondii*. *Marine Biotechnology*, 21(2), pp. 229–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10126-019-09875-0>.
- Sinclair, N. A., Herring, C. M. 1975. Isolation of *Penicillium corylophilum* Dierckx from acid mine water and its optimal growth on hydrocarbons at acid pH. *Mycopathologia*, 57(1), pp. 19–22. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00431172>.
- Singh, H. 2006. Mycoremediation. Fungal bioremediation. Hoboken, Wiley.
- Tripathi, P., Singh, P. C., Mishra, A., Chauhan, P. S. et al. 2013. *Trichoderma*: A potential bioremediator for environmental clean-up. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(4), pp. 541–550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0553-7>.
- Vasconcelos, M. R., Vieira, G. A., Otero, I. V., Bonugli-Santos, R. C. et al. 2019. Pyrene degradation by marine-derived ascomycete: Process optimization, toxicity, and metabolic analyses. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), pp. 12412–12424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04518-2>.
- Zafra, G., Cortés-Espinosa, D. V. 2015. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Trichoderma* species: A mini review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(24), pp. 19426–19433. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5602-4>.
- Zajc, J., Gostinčar, C., Černoša, A., Gunde-Cimerman, N. 2019. Stress-tolerant yeasts: Opportunistic pathogenicity versus biocontrol potential. *Genes*, 10(1–42), pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes10010042>.
- Zhang, Q., Gong, J.-S., Dong, T.-T., Liu, T.-T. et al. 2017. Nitrile-hydrolyzing enzyme from *Meyerozyma guilliermondii* and its potential in biosynthesis of 3-hydroxypropionic acid. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 40(6), pp. 901–910. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1754-6>.
- Zheng, Z., Obbard, J. P. 2003. Oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fungal isolates from an oil contaminated refinery soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(3), pp. 173–176. DOI: <https://doi.org/10.1065/espr2002.07.126>.

Сведения об авторах

Исакова Екатерина Александровна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Лаборатория медицинских и биологических технологий КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, аспирант; e-mail: ya.kristina-i2014@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-0953>

Ekaterina A. Isakova – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Laboratory of Medical and Biological Technologies KSC RAS, Researcher; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, PhD Student; e-mail: ya.kristina-i2014@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-0953>

Корнейкова Мария Владимировна – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: korneykova.maria@mail.ru

Maria V. Korneykova – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher; e-mail: korneykova.maria@mail.ru