

Научная статья
УДК 579.695; 546.85; 502.55; 661.63
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.031

БИОДЕГРАДАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ ПРИ ПОМОЩИ ШТАММОВ *ASPERGILLUS NIGER*

**Антон Зуфарович Миндубаев^{1, 2}, Эдуард Викторович Бабынин³,
Салима Тахиятулловна Минзанова⁴, Любовь Геннадьевна Миронова⁵,
Елена Казимировна Бадеева⁶**

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

²«Инновационные технологии детоксикации», Казань, Россия

³Татарский научно-исследовательский институт агрохимии и почвоведения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия

^{4, 5, 6}Институт органической и физической химии имени А. Е. Арбузова Казанского научного центра Российской академии наук, Казань, Россия

¹mindubaev-az@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8596-7805>

³edward.b67@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2285-8879>

⁴minzanova@iopc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9678-8821>

⁵mironova1963@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1919-571X>

⁶ybadееv.61@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7305-8949>

Аннотация

На протяжении четырнадцати лет нашим коллективом ведется работа по исследованию биодegradации, в первую очередь, фосфорсодержащих соединений. Впервые в мире осуществлена биологическая детоксикация элементарного — белого и красного — фосфора. Получены культуры плесневых грибов, превращающие вещество первого класса опасности — белый фосфор — в безвредный фосфат. Это первый пример включения белого фосфора в биосферный круговорот элемента фосфора. В перспективе результаты исследований могут стать основой эффективных методов предотвращения и ликвидации загрязнений токсичными соединениями фосфора. Поэтому исследование представляет интерес для практического применения и фундаментальной науки.

Ключевые слова

биодegradация, токсичные соединения фосфора, *Aspergillus niger*

Благодарности:

работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-08-31091 мол_а, Фонда содействия инновациям, проект № 39113 (заявка № С1-34299) и Инвестиционно-Венчурного фонда Республики Татарстан (заявка №4277-23092021, договор № 13/71/2022).

Для цитирования:

Биодegradация промышленных поллютантов при помощи штаммов *aspergillus niger* / А. З. Миндубаев [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 1. С. 171–179. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.031

Original article

THE INDUSTRIAL POLLUTANTS BIODEGRADATION OF USING *ASPERGILLUS NIGER* STRAINS

**Anton Z. Mindubaev^{1, 2}, Salima T. Minzanova³, Edward V. Babynin⁴, Lubov' G. Mironova⁵,
Elena K. Badeeva⁶**

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Innovative Technologies of Detoxification, Kazan, Russia

³Tatar Research Institute of Agricultural Chemistry and Soil Science — Subdivision of the Federal Research Center "Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences", Kazan, Russia

^{4, 5, 6}Institute of Organic and Physical Chemistry named after A. E. Arbuzov, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Arbuzov, Kazan, Russia

¹mindubaev-az@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8596-7805>

³edward.b67@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2285-8879>

⁴minzanova@iopc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9678-8821>

⁵mironova1963@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1919-571X>

⁶ybadееv.61@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7305-8949>

© Миндубаев А. З., Бабынин Э. В., Минзанова С. Т., Миронова Л. Г., Бадеева Е. К., 2023

Abstract

For fourteen years our team has been working on the research of biodegradation, primarily of phosphorus-containing compounds. The world's first biological detoxification of elemental — white and red — phosphorus was carried out. We obtained mold fungi cultures, which transform a substance of the first hazard class white phosphorus into harmless phosphate. This is the first example of the inclusion of white phosphorus into the biospheric cycle of the phosphorus element. In the future, the results of the research may become the basis for effective methods of preventing and eliminating pollution by toxic phosphorus compounds. Therefore, the research is of interest both for practical application and from the point of view of fundamental science.

Keywords:

biodegradation, toxic phosphorus compounds, *Aspergillus niger*

Acknowledgments:

the work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 14-08-31091 mol_a, the Innovation Promotion Fund, project No. 39113 (application No. C1-34299) and the Investment and Venture Foundation of the Republic of Tatarstan (application No. 4277-23092021, contract No. 13/71/2022).

For citation:

The industrial pollutants biodegradation of using aspergillus niger strains / A. Z. Mindubaev [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 171–179. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.031

Введение

Биодеградация занимает важное место среди методов обезвреживания токсичных загрязнений окружающей среды. В ее основе лежат происходящие в природе естественные процессы биологической детоксикации [1].

На рисунке 1 представлена схема биосинтеза ценных природных веществ — аминокислот, сахаров и липидов — из веществ первого класса опасности, основанная на реальных примерах, заимствованных из литературных источников [2–24]. Данные примеры демонстрируют возможность обезвреживания таким же способом другого вещества первого класса опасности (белого фосфора), биодеградацию которого мы исследуем.

Белый фосфор P_4 является одним из самых опасных загрязнителей окружающей среды. Хроническое отравление этим веществом приводит к глубокой инвалидности. Тем не менее он широко применяется в промышленности как одно из наиболее востребованных соединений в производстве фосфорных удобрений, лекарств, полимеров и ряда других практически значимых веществ и материалов [25].

Химические свойства белого фосфора имеют специфику. На воздухе он быстро окисляется кислородом, но в водной среде устойчив — его хранят исключительно в толще воды. Именно по этой причине особенно опасны загрязнения белым фосфором водоемов. Чрезвычайно низкая растворимость белого фосфора в воде (0,0003 г / л при 15 °С) является препятствием на пути его эффективной детоксикации. В водной среде он образует суспензию, частицы которой взаимодействуют с окислителями только поверхностью, покрываясь пассивирующей пленкой из полифосфата [26, 27]. Согласно расчетам, период полураспада частиц белого фосфора в анаэробных условиях донных отложений может достигать 10 000 лет [26]!

Сточные воды с предприятий, производящих или потребляющих белый фосфор, в англоязычной литературе даже получили отдельное наименование — «фосфорные воды» (phossy water), что свидетельствует о значении проблемы их обезвреживания. Содержание основного загрязнителя в phossy water не должно превышать двух частей на миллион [27], однако эта величина кажется исчезающе малой только на первый взгляд. Следует помнить о том, что белый фосфор относится к веществам самого высокого класса опасности.

Самые сильные загрязнения происходят в окрестностях военных полигонов США, где меры очистки не предпринимаются вообще [26]. Гидрофобность белого фосфора сочетается с высокой липофильностью. Это свойство делает его еще более опасным, поскольку белый фосфор легко накапливается в жировой ткани, богатых жиром органах и кожных покровах. Особенно страдают от загрязнения данным веществом водоплавающие птицы, поскольку белый фосфор проникает в их организм из водной среды во время кормежки. Кроме того, водоплавающие птицы накапливают в организме много жира. В организм хищных птиц белый фосфор также проникает с пищей и зачастую накапливается в летальных концентрациях. Также белый фосфор обнаружен в организме пресноводных рыб [26].

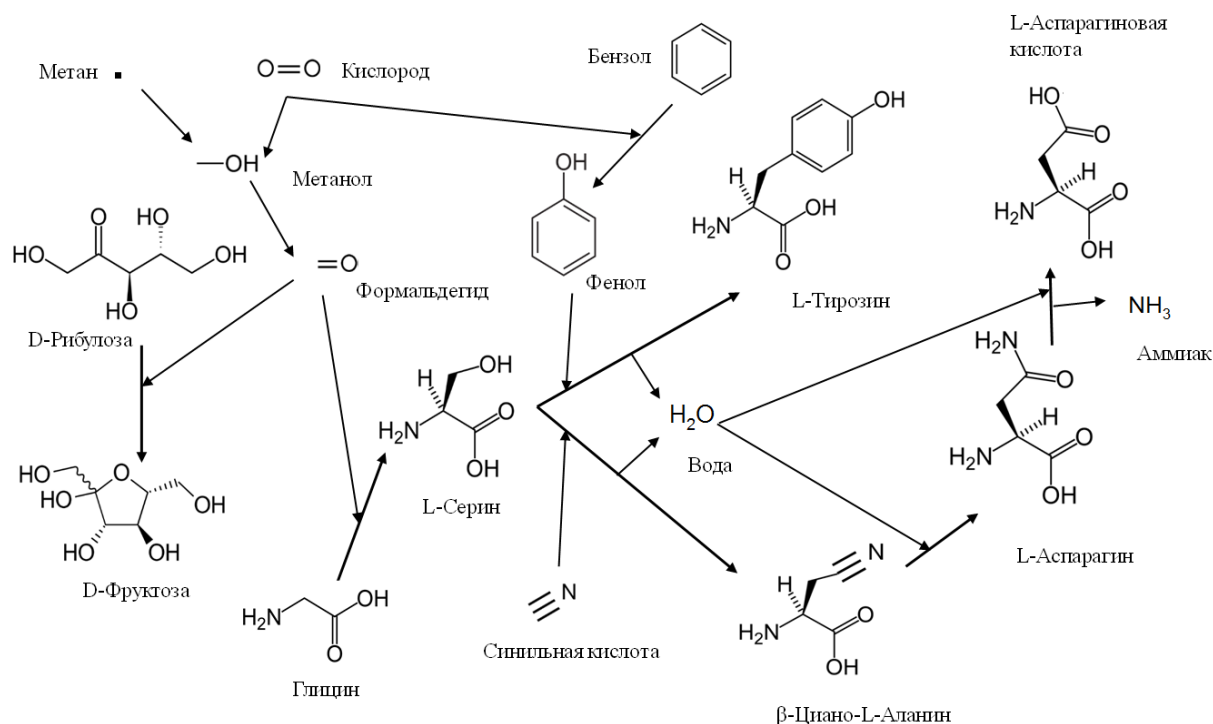


Рис. 1. Бактерии метанотрофы *Methylococcus capsulatus* (Bath)) способны окислять метан в метанол [2] кислородом воздуха [3], а дальнейшее его превращение во фруктозу (предшественник глюкозы, важнейший источник углерода [4]) осуществляют гипертермофильные археи *Pyrococcus horikoshii* OT3 (у метилотрофных дрожжей *Candida boidinii* путь отличается — они присоединяют формальдегид к D-ксилозу с образованием двух трехуглеродных сахаров, которые далее могут превращаться в глицерин, компонент жиров). Образование серина из метанола производится облигатными метилотрофными бактериями (например, *Methylomonas aminofaciens*) [5, 6]. Фенол из бензола образуется при помощи кислорода — пероксигеназой гриба полевика цилиндрического (*Agrocybe aegerita*) [7], тирозин из фенола — обратной реакцией, катализируемой тирозиназой кишечной бактерии *Citrobacter freundii* [8], β-цианоаланин из цианида — культурами фиолетовых хромобактерий *Chromobacterium violaceum* [9], аспарагин и аспарагиновая кислота из β-цианоаланина — высшими растениями, такими как ячмень обыкновенный *Hordeum vulgare* [10]. На схеме не показано, но растения (например, резуховидка Тяля *Arabidopsis thaliana*) и микроорганизмы (гемофильная палочка *Haemophilus influenzae*) [11] способны аналогичным образом утилизировать сероводород, включая его в состав аминокислоты цистеин. Чрезвычайно токсичный селеноводород бактерии кишечные палочки (*Escherichia coli*) присоединяют к серину с образованием селеноцистеина — аминокислоты, входящей в активные центры ряда ферментов [12]. Еще более токсичный теллуридоводород ряд грибов в условиях дефицита серы превращают в теллурицистеин — аминокислоту, придающую уникальные свойства ряду белков [13, 14]. Возможность аналогичного включения в состав аминокислот (например, гипотетического полоноцистеина) и белков самого тяжелого халькогена (исключительно токсичного, радиоактивного полония) в настоящее время дискутируется [15]. Бактерии, растения и грибы из индола и серина синтезируют триптофан [16]. Стрептомицет беловатый *Streptomyces albus* PD-1 аналогичным образом утилизирует аммиак с образованием полидиаминопропионовой кислоты [17]. Диаминопропионовая кислота может образоваться и в результате присоединения к серину чрезвычайно токсичного азидо: промежуточным метаболитом является β-азидоаланин [18], далее азидная группа восстанавливается до аминогруппы и молекулярного азота цитохромом P450 [19]. Исходный глицин на схеме может образовываться в результате биodeградации гербицида глифосата бактерией синегнойной палочкой *Pseudomonas aeruginosa* [20]. Глицерин и ряд аминокислот могут образовываться и из других ксенобиотиков, таких как акролеин [21, 22], лекарственные препараты [23, 24]. Рисунок и подпись к нему А. З. Миндубаева

Необходимо вспомнить тяжелейшую экологическую ситуацию на обанкротившемся химическом заводе «Фосфор» в городе Шымкенте (бывший Чимкент, Казахстан), территория которого окружена шламовыми озерами площадью в 30 га, содержащими более 500 тыс. т фосфорного шлама! Кроме того, фосфор содержится в донном песке реки Бадам, протекающей по территории предприятия. Эту местность уже прозвали казахским Чернобылем. Здесь неоднократно происходили несчастные случаи отравлений и ожогов. На территории Российской Федерации наиболее загрязненными белым фосфором территориями являются 30 га на территории обанкротившегося предприятия ОАО «Фосфор» (город Тольятти, Самарская область); шламонакопители общей площадью 145 га ПАО «Новочебоксарский Химпром» (145 га); шламонакопитель «Белое море» (26 га, 4 млн т химических отходов), ВОАО «Волгоградский Химпром»; огромный шламонакопитель (92 га, 7 млн т химических отходов) ООО «Химпром Технологии» (город Дзержинск, Нижегородская область). Следует иметь в виду, что все источники загрязнений белым фосфором в России соединены общей водной артерией — рекой Волга. Следовательно, в случае техногенных аварий и катастроф, связанных с белым фосфором, создается прямая угроза экологической обстановке во всем Поволжье [28].

Результаты

Более восьми лет назад, в октябре 2014 г., нами выделена экстремотолерантная культура гриба черного аспергилла, превращающая токсичные соединения фосфора в фосфат, который может служить подкормкой для растений [28]. Мы впервые в мире наблюдали биodeградацию аллотропных модификаций элементного фосфора, не только белого, но и красного (рис. 2).



Рис. 2. Колонии чёрных аспергиллов в среде, содержащей 0,05 % белого фосфора. Эта концентрация соответствует 250 ПДК! Место съемки: виварий микробиологической лаборатории ИОФХ. Снимок на цифровой фотоаппарат Samsung, 13 10 2014 г.

При воздействии белого фосфора наблюдается резкое изменение морфологии (таблица) и протеома исследуемых грибов, позволяющее им более эффективно защищаться от токсического воздействия, существовать в загрязненной среде и превращать токсичные загрязнители в компоненты фосфорных удобрений [29].

Результаты проверки на нормальность по критерию Д'Агостино — Пирсона величин толщины клеточной стенки и размера митохондрий у *A. niger* в присутствии белого фосфора (опыт) и в контроле

<i>A. niger</i> AM1	Толщина клеточной стенки		Диаметр митохондрий	
	K2-значение	P-значение	K2-значение	P-значение
Опыт	1,21	0,1812	1,614	0,4461
Контроль	2,491	0,2877	4,464	0,1073

Происхождение штамма *Aspergillus niger*, выделенного из емкости с кусковым белым фосфором, воспроизведена с построением филогенетического дерева. Для сравнения использовались штаммы *A. niger*, выделенные в разных странах мира и представленные в базе *National Center for Biotechnology Information* (NCBI). Результат сравнения свидетельствует о следующем. В наибольшем родстве со штаммом AM1 состоят два штамма черного аспергилла из почвы с соевых полей в районе Нанкина (Китай), которые способны к растворению малорастворимых в воде почвенных фосфатных минералов при помощи органических кислот, которые они продуцируют. Указанные штаммы выделены из ризосферы растений сои (*Glycine max*) и, по всей видимости, повышают эффективность снабжения растений фосфором, вступая с ними в симбиотические отношения. Они имеют высокий процент сходства по гену ITS с объектом нашего исследования — *A. niger* AM1.

Роль контролей выполняют внешние группы — штаммы других видов: аспергилл атласный *A. bombycis* и аспергилл дымящийся *A. fumigatus*. Штаммы из одного кластера, состоящие в близком родстве друг с другом, должны быть сходны по характеристикам. Филогенетический анализ позволяет приблизительно оценивать потенциальную токсичность, патогенность и аллергенность штаммов, а также ряд параметров, интересных для биотехнологов.

Таким образом, AM1 относится к кластеру штаммов, распространенному в Южной Азии и адаптированному к существованию в условиях нехватки биодоступного фосфора. Китай производит свыше 70 % белого фосфора в мире, поэтому вещество (а с ним и споры микроорганизмов) могли быть импортированы в Россию из этой страны.

Для того чтобы подтвердить родство с известными солубилизаторами фосфатов, мы исследовали способность *Aspergillus niger* AM1 метаболизировать ортофосфат кальция $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ — наиболее распространенную форму фосфора в природе, но при этом малодоступную для живых организмов из-за практической нерастворимости в воде. Оказалось, что штамм потребляет нерастворимый фосфат так же легко, как растворимые фосфаты, входящие в состав культуральных сред, то есть действительно является солубилизатором фосфата, как следует из теоретических результатов анализа базы NCBI.

Интересно, что в декабре 2016 г. мы получили дочерний штамм гриба *A. niger* AM2, еще более адаптированный к росту в среде с белым фосфором. Утолщенная клеточная стенка и увеличенные митохондрии у него наблюдаются и в контроле, в отсутствие этого токсичного вещества [29].

Для фосфорных соединений велики перспективы биodeградации по причине того, что опасность фосфатов для окружающей среды существенно ниже, чем восстановленных соединений фосфора. Элемент фосфор в виде простых веществ и восстановленных соединений является опаснейшим загрязнителем окружающей среды, поскольку эти вещества сильно ядовиты, а некоторые к тому же огнеопасны. Однако живые клетки всегда накапливают окисленную форму фосфора — фосфат — в составе самых разнообразных органических и неорганических молекул. Если доля фосфора в земной коре составляет 0.12 %, то в биомассе живых организмов концентрация этого элемента составляет уже 3 %, то есть в 25 раз выше! Для фосфорорганических соединений биodeградация уже применяется [30]. Но для элементного (белого и красного) фосфора она стала известна только из наших работ.

Нами создано ООО «Интехтокс», которое вошло в реестр участников проекта «Сколково» (рис. 3). В нем ведутся прикладные научные исследования по созданию биопрепаратов, способных очищать почвы и сточные воды от фосфорсодержащих загрязнителей. В январе 2023 г. наше ООО отмечает круглую дату — пятилетний юбилей. В настоящее время мы исследуем биodeградацию при помощи AM1 и AM2 веществ, не содержащих фосфор (нефтей и нефтепродуктов, древесины и продуктов ее переработки). Также планируем изучать переработку полимерных материалов данными штаммами, извлечение редких элементов из минералов.



Рис. 3. Логотип ООО «Интехтокс»

Впоследствии мы предполагаем внедрить технологию на шламонакопителях ПАО «Новочебоксарский Химпром», ВОАО «Волгоградский Химпром», «Камтэкс Химпром» (город Пермь, Россия), ООО «Химпром Технология» (город Дзержинск), Химическом арсенале (поселок Марадыково, Кировская область).

Нашей разработкой уже заинтересовались партнеры из Самарского политеха (СамГТУ), планирующие ликвидацию очагов загрязнения желтым фосфором территории бывшего ОАО «Фосфор» в рамках Стратегии социально-экономического развития Самарской области до 2030 года.

Выводы

С одной стороны, проводимые исследования могут лечь в основу методов очистки природных сред, загрязненных веществами даже первого класса опасности. То есть прикладной аспект работы очевиден. С другой стороны, исследования интересны с позиций фундаментальной науки, поскольку впервые установлена способность живых организмов использовать простое вещество — белый фосфор — в качестве источника биогенного элемента фосфора, а также осуществлено включение элементного фосфора в природный круговорот фосфора. Соответственно, есть возможность исследовать еще не описанные метаболические пути.

Очень интересным объектом исследований стали штаммы черного аспергилла, способные к биоразложению широкого спектра продуктов, в первую очередь элементного фосфора и фосфорных соединений. По мере изучения открываются все новые потенциальные сферы применения этих штаммов.

Список источников

1. Meckenstock R. U., Elsner M., Griebler C., Lueders T., Stumpp C., Aamand J., Agathos S.N., Albrechtsen H.-J., Bastiaens L., Bjerg P.L., Boon N., Dejonghe W., Huang W. E., Schmidt S. I., Smolders E., Sørensen S. R., Springael D., van Breukelen B. M. Biodegradation: updating the concepts of control for microbial cleanup in contaminated aquifers // *Environmental Science & Technology*. 2015. Vol. 49. Issue 12. P.7073–7081. doi:10.1021/acs.est.5b00715
2. Sirajuddin S., Rosenzweig A. C. Enzymatic Oxidation of Methane // *Biochemistry*. 2015. Vol. 54, No. 14. P. 2283–2294. doi:10.1021/acs.biochem.5b00198
3. Valentine J. S., Greenberg A., Foote C. S., Liebman J. F. Active Oxygen in Biochemistry // Springer. 1995. 463 p.
4. Kovalevsky A. Y., Hanson L., Fisher S. Z., Mustyakimov M., Mason S.A., Forsyth V. T., Blakeley M. P., Keen D. A., Wagner T., Carrell H. L., Katz A. K., Glusker J. P., Langan P. Metal Ion Roles and the Movement of Hydrogen during Reaction Catalyzed by D-Xylose Isomerase: A Joint X-Ray and Neutron Diffraction Study // *Structure*. 2010. Vol. 18, No. 6. P. 688–699. doi:10.1016/j.str.2010.03.011
5. Yurimoto H., Kato N., Sakai Y. Assimilation, Dissimilation, and Detoxification of Formaldehyde, a Central Metabolic Intermediate of Methylophilic Metabolism // *The Chemical Record*. 2005. Vol. 5, No. 6. P. 367–375. doi:10.1002/tcr.20056
6. Koga Y., Morii H. Biosynthesis of Ether-Type Polar Lipids in Archaea and Evolutionary Considerations // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2007. Vol. 71, No. 1. P. 97–120. doi:10.1128/MMBR.00033-06
7. Karich A., Kluge M., Ullrich R., Hofrichter M. Benzene oxygenation and oxidation by the peroxygenase of *Agrocybe aegerita* // *AMB Express*. 2013. Vol. 3 (1), No. 5. P. 1–8. doi:10.1186/2191-0855-3-5
8. Fuganti C., Ghiringhelli D., Giangrasso D., Grasselli P. Stereochemical course of the enzymic synthesis of L-tyrosine from phenol and L-serine catalysed by tyrosine phenol lyase from *Escherichia intermedia* // *J.Chem. Soc. Chem. Commun*. 1974. No. 18. P. 726–727. doi:10.1039/C39740000726
9. Brysk M. M., Corpe W. A., Hanks L. V. β -Cyanoalanine Formation by *Chromobacterium violaceum* // *J Bacteriol*. 1969. Vol. 97, No. 1. P. 322–327. doi:10.1128/jb.97.1.322-327.1969
10. Machingura M., Salomon E., Jez J. M., Ebbs S. D. The β -cyanoalanine synthase pathway: beyond cyanide detoxification // *Plant, Cell and Environment*. 2016. Vol. 39, No. 10. P. 2329–2341. doi:10.1111/pce.12755
11. Jez J. M., Dey S. The cysteine regulatory complex from plants and microbes: what was old is new again // *Current Opinion in Structural Biology*. 2013. Vol. 23, No. 2. P. 302–310. doi:10.1016/j.sbi.2013.02.011
12. Turanov A. A., Xu X.-M., Carlson B. A., Yoo M.-H., Gladyshev V. N., Hatfield D. L. Biosynthesis of Selenocysteine, the 21st Amino Acid in the Genetic Code, and a Novel Pathway for Cysteine Biosynthesis // *Adv. Nutr*. 2011. Vol. 2. P. 122–128. doi:10.3945/an.110.000265
13. Ba L. A., Döring M., Jamier V., Jacob C. Tellurium: an element with great biological potency and potential // *Org. Biomol. Chem*. 2010. Vol. 8, No. 19. P. 4203–4216. doi:10.1039/c0Ob00086h
14. Liu X., Silks L. A., Liu C., Ollivault-Shiflett M., Huang X., Li J., Luo G., Hou Y.-M., Liu J., Shen J. Incorporation of Tellurocysteine into Glutathione Transferase Generates High Glutathione Peroxidase Efficiency // *Angew. Chem. Int. Ed*. 2009. Vol. 48, No. 11. P. 2020–2023. doi:10.1002/anie.200805365

15. Cherrier J., Burnett W. C., LaRock P. A. Uptake of polonium and sulfur by bacteria // *Geomicrobiology Journal*. 1995. Vol. 13, No.2. P. 103–115. doi:10.1080/01490459509378009
16. Buller A. R., van Roye P., Murciano-Calles J., Arnold F.H. Tryptophan Synthase Uses an Atypical Mechanism to Achieve Substrate Specificity // *Biochemistry*. 2016. Vol. 55. P. 7043–7046. doi:10.1021/acs.biochem.6b01127
17. Xu Z., Sun Z., Li S., Xu Z., Cao C., Xu Z., Feng X., Xu H. Systematic unravelling of the biosynthesis of poly (L-diaminopropionic acid) in *Streptomyces albulus* PD-1 // *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5, No. 17400. P. 1–10. doi:10.1038/srep17400
18. Sadiq M. F., Owais W. M. Mutagenicity of sodium azide and its metabolite azidoalanine in *Drosophila melanogaster* // *Mutation Research*. 2000. Vol. 469, No. 2. P. 253–257. doi:10.1016/S1383-5718(00)00079-6
19. O'Connor L. J., Mistry I. N., Collins S. L., Folkes L. K., Brown G., Conway S. J., Hammond E. M. CYP450 Enzymes Effect Oxygen-Dependent Reduction of Azide- Based Fluorogenic Dyes // *ACS Cent. Sci.* 2017. Vol. 3, No. 1. P. 20–30. doi:10.1021/acscentsci.6b00276
20. Willsey G. G., Wargo M. J. Sarcosine Catabolism in *Pseudomonas aeruginosa* Is Transcriptionally Regulated by SouR // *J Bacteriol.* 2016. Vol. 198, No. 2. P. 301–310. doi:10.1128/JB.00739-15
21. Faroon O., Roney N., Taylor J., Ashizawa A., Lumkin M. H., Plewak D. Acrolein health effects // *Toxicology and industrial health*. 2008. Vol. 24, No. 7. P. 447–490. doi:10.1177/0748233708094188
22. Nordone A. J., Dotson T. A., Kovacs M. F., Doane R., Biever R. C. Metabolism of [¹⁴C] acrolein (magnacide h® herbicide): nature and magnitude of residues in freshwater fish and shellfish // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1998. Vol. 17, No. 2. P. 276–281. doi:10.1002/etc.5620170220
23. Nagasawa T., Yamada H. Enzymatic Transformations of 3-Chloroalanine into Useful Amino Acids // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1986. Vol. 13, No. 2. P. 147–165. doi:10.1007/BF02798908
24. Wang Y., Liu A. Carbon-fluorine bond cleavage mediated by metalloenzymes // *Chem. Soc. Rev.* 2020. Vol. 49, No. 14. P. 4906–4925. doi:10.1039/C9CS00740G
25. Geeson M. B., Cummins C. C. Let's Make White Phosphorus Obsolete // *ACS Cent. Sci.* 2020. Vol. 6, No. 6. P. 848–860. doi:10.1021/acscentsci.0c00332
26. Walsh M. E., Collins C. M., Racine C. Persistence of White Phosphorus Particles in Sediment // *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*. 1995. 51 p.
27. Barber J. C. Processes for the disposal and recovery of phosphy water // *United States Patent 5549878*, 1996.
28. Mindubaev A. Z., Babynin E. V., Bedeeva E. K., Minzanova S. T., Mironova L. G., Akosah Y. A. Biological Degradation of Yellow (White) Phosphorus, a Compound of First Class Hazard // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2021. Vol. 66, No. 8. P. 1239–1244. doi:10.1134/S0036023621080155
29. Mindubaev A. Z., Kuznetsova S. V., Evtyugin V. G., Daminova A. G., Grigoryeva T. V., Romanova Y. D., Romanova V. A., Babaev V. M., Buzyurova D. N., Babynin E. V., Badeeva E. K., Minzanova S. T., Mironova L. G. Effect of White Phosphorus on the Survival, Cellular Morphology, and Proteome of *Aspergillus niger* // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2020. Vol. 56, No. 2. P. 194–201. doi:10.1134/S0003683820020118
30. Singh B. K., Walker A. Microbial degradation of organophosphorus compounds // *FEMS Microbiology Reviews*. 2006. Vol. 30, No. 3. P. 428–471. doi:10.1111/j.1574-6976.2006.00018.x

References

1. Meckenstock R. U., Elsner M., Griebler C., Lueders T., Stumpp C., Aamand J., Agathos S. N., Albrechtsen H.-J., Bastiaens L., Bjerg P.L., Boon N., Dejonghe W., Huang W. E., Schmidt S. I., Smolders E., Sørensen S. R., Springael D., van Breukelen B. M. Biodegradation: updating the concepts of control for microbial cleanup in contaminated aquifers. *Environmental Science & Technology*, 2015, Vol. 49, Issue 12, pp. 7073–7081. doi:10.1021/acs.est.5b00715
2. Sirajuddin S., Rosenzweig A. C. Enzymatic Oxidation of Methane. *Biochemistry*, 2015, Vol. 54, No. 14, pp. 2283–2294. doi:10.1021/acs.biochem.5b00198
3. Valentine J. S., Greenberg A., Foote C. S., Liebman J. F. Active Oxygen in Biochemistry. Springer, 1995, 463 p.
4. Kovalevsky A. Y., Hanson L., Fisher S. Z., Mustyakimov M., Mason S. A., Forsyth V. T., Blakeley M. P., Keen D. A., Wagner T., Carrell H. L., Katz A. K., Glusker J. P., Langan P. Metal Ion Roles and the Movement of Hydrogen during Reaction Catalyzed by D-Xylose Isomerase: A Joint X-Ray and Neutron Diffraction Study. *Structure*, 2010, Vol. 18, No. 6, pp. 688–699. doi:10.1016/j.str.2010.03.011
5. Yurimoto H., Kato N., Sakai Y. Assimilation, Dissimilation, and Detoxification of Formaldehyde, a Central Metabolic Intermediate of Methylophilic Metabolism. *The Chemical Record*, 2005, Vol. 5, No. 6, pp. 367–375. doi:10.1002/tcr.20056
6. Koga Y., Morii H. Biosynthesis of Ether-Type Polar Lipids in Archaea and Evolutionary Considerations. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2007, Vol. 71, No. 1, pp. 97–120. doi:10.1128/MMBR.00033-06

7. Karich A., Kluge M., Ullrich R., Hofrichter M. Benzene oxygenation and oxidation by the peroxxygenase of *Agrocybe aegerita*. *AMB Express*, 2013, Vol. 3 (1), No. 5, pp. 1–8. doi:10.1186/2191-0855-3-5
8. Fuganti C., Ghiringhelli D., Giangrasso D., Grasselli P. Stereochemical course of the enzymic synthesis of L-tyrosine from phenol and L-serine catalysed by tyrosine phenol lyase from *Escherichia intermedia*. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, 1974, No. 18, pp. 726–727. doi:10.1039/C39740000726
9. Brysk M. M., Corpe W. A., Hanks L. V. β -Cyanoalanine Formation by *Chromobacterium violaceum*. *J. Bacteriol.*, 1969, Vol. 97, No. 1, pp. 322–327. doi:10.1128/jb.97.1.322-327.1969
10. Machingura M., Salomon E., Jez J. M., Ebbs S. D. The β -cyanoalanine synthase pathway: beyond cyanide detoxification. *Plant, Cell and Environment*, 2016, Vol. 39, No. 10, pp. 2329–2341. doi:10.1111/pce.12755
11. Jez J. M., Dey S. The cysteine regulatory complex from plants and microbes: what was old is new again. *Current Opinion in Structural Biology*, 2013, Vol. 23, No. 2, pp. 302–310. doi:10.1016/j.sbi.2013.02.011
12. Turanov A. A., Xu X.-M., Carlson B. A., Yoo M.-H., Gladyshev V. N., Hatfield D. L. Biosynthesis of Selenocysteine, the 21st Amino Acid in the Genetic Code, and a Novel Pathway for Cysteine Biosynthesis. *Adv. Nutr.*, 2011, Vol. 2, pp. 122–128. doi:10.3945/an.110.000265
13. Ba L. A., Döring M., Jamier V., Jacob C. Tellurium: an element with great biological potency and potential. *Org. Biomol. Chem.*, 2010, Vol. 8, No. 19, pp. 4203–4216. doi:10.1039/c0Ob00086h
14. Liu X., Silks L. A., Liu C., Ollivault-Shiflett M., Huang X., Li J., Luo G., Hou Y.-M., Liu J., Shen J. Incorporation of Tellurocysteine into Glutathione Transferase Generates High Glutathione Peroxidase Efficiency. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2009, Vol. 48, No. 11, pp. 2020–2023. doi:10.1002/anie.200805365
15. Cherrier J., Burnett W. C., LaRock P. A. Uptake of polonium and sulfur by bacteria. *Geomicrobiology Journal*, 1995, Vol. 13, No. 2, pp. 103–115. doi:10.1080/01490459509378009
16. Buller A. R., van Roye P., Murciano-Calles J., Arnold F. H. Tryptophan Synthase Uses an Atypical Mechanism to Achieve Substrate Specificity. *Biochemistry*, 2016, Vol. 55, pp. 7043–7046. doi:10.1021/acs.biochem.6b01127
17. Xu Z., Sun Z., Li S., Xu Z., Cao C., Xu Z., Feng X., Xu H. Systematic unravelling of the biosynthesis of poly (L-diaminopropionic acid) in *Streptomyces albulus* PD-1. *Sci. Rep.*, 2015, Vol. 5, No. 17400, pp. 1–10. doi:10.1038/srep17400
18. Sadiq M. F., Owais W. M. Mutagenicity of sodium azide and its metabolite azidoalanine in *Drosophila melanogaster*. *Mutation Research*, 2000, Vol. 469, No. 2, pp. 253–257. doi:10.1016/S1383-5718(00)00079-6
19. O'Connor L. J., Mistry I. N., Collins S. L., Folkes L. K., Brown G., Conway S. J., Hammond E. M. CYP450 Enzymes Effect Oxygen-Dependent Reduction of Azide- Based Fluorogenic Dyes. *ACS Cent. Sci.*, 2017, Vol. 3, No. 1, pp. 20–30. doi:10.1021/acscentsci.6b00276
20. Willsey G. G., Wargo M. J. Sarcosine Catabolism in *Pseudomonas aeruginosa* Is Transcriptionally Regulated by SouR. *J. Bacteriol.*, 2016, Vol. 198, No. 2, pp. 301–310. doi:10.1128/JB.00739-15
21. Faroon O., Roney N., Taylor J., Ashizawa A., Lumkin M. H., Plewak D. Acrolein health effects. *Toxicology and industrial health*, 2008, Vol. 24, No. 7, pp. 447–490. doi:10.1177/0748233708094188
22. Nordone A. J., Dotson T. A., Kovacs M. F., Doane R., Biever R. C. Metabolism of [^{14}C] acrolein (magnacide h® herbicide): nature and magnitude of residues in freshwater fish and shellfish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, Vol. 17, No. 2, pp. 276–281. doi:10.1002/etc.5620170220
23. Nagasawa T., Yamada H. Enzymatic Transformations of 3-Chloroalanine into Useful Amino Acids. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1986, Vol. 13, No. 2, pp. 147–165. doi:10.1007/BF02798908
24. Wang Y., Liu A. Carbon–fluorine bond cleavage mediated by metalloenzymes. *Chem. Soc. Rev.*, 2020, Vol. 49, No. 14, pp. 4906–4925. doi:10.1039/C9CS00740G
25. Geeson M. B., Cummins C. C. Let's Make White Phosphorus Obsolete. *ACS Cent. Sci.*, 2020, Vol. 6, No. 6, pp. 848–860. doi:10.1021/acscentsci.0c00332
26. Walsh M. E., Collins C. M., Racine C. Persistence of White Phosphorus Particles in Sediment. *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*, 1995, 51 p.
27. Barber J. C. Processes for the disposal and recovery of phossy water. United States Patent 5549878, 1996.
28. Mindubaev A. Z., Babynin E. V., Bedeeva E. K., Minzanova S. T., Mironova L. G., Akosah Y. A. Biological Degradation of Yellow (White) Phosphorus, a Compound of First Class Hazard. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2021, Vol. 66, no. 8, pp. 1239–1244. doi: 10.1134/S0036023621080155
29. Mindubaev A. Z., Kuznetsova S. V., Evtyugin V. G., Daminova A. G., Grigoryeva T. V., Romanova Y. D., Romanova V. A., Babaev V. M., Buzyurova D. N., Babynin E. V., Badeeva E. K., Minzanova S. T., Mironova L. G. Effect of White Phosphorus on the Survival, Cellular Morphology, and Proteome of *Aspergillus niger*. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2020, Vol. 56, No. 2, pp. 194–201. doi:10.1134/S0003683820020118
30. Singh B. K., Walker A. Microbial degradation of organophosphorus compounds. *FEMS Microbiology Reviews*, 2006, Vol. 30, no. 3, pp. 428–471. doi:10.1111/j.1574-6976.2006.00018.x

Информация об авторах

А. З. Миндубаев — кандидат химических наук, магистрант, генеральный директор общества с ограниченной ответственностью «Инновационные технологии детоксикации»;

Э. В. Бабынин — кандидат биологических наук, доцент;

С. Т. Минзанова — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник;

Л. Г. Миронова — инженер-исследователь;

Е. К. Бадеева — кандидат химических наук, научный сотрудник.

Information about the authors

A. Z. Mindubaev — Ph.D. in Chemistry, undergraduate, general director of the Limited liability company Innovative technologies of detoxification;

E. V. Babynin — Ph.D. in Biology, associate professor;

S. T. Minzanova — Ph.D. in Technology, associate professor;

L. G. Mironova — research-engineer;

E. K. Badeeva — Ph.D. in Chemistry, researcher.

Статья поступила в редакцию 21.11.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 21.11.2022; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.