

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2024, Том 11, № 1 / 2024, Vol. 11, Iss. 1 <https://resources.today/issue-1-2024.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/08INOR124.pdf>

DOI: 10.15862/08INOR124 (<https://doi.org/10.15862/08INOR124>)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Досаев, А. А. Системный анализ микробиологической очистки воды / А. А. Досаев, А. С. Скичко // Отходы и ресурсы. — 2024. — Т. 11. — № 1. — URL: <https://resources.today/PDF/08INOR124.pdf>

DOI: 10.15862/08INOR124

For citation:

Dosaev A.A., Skichko A.S. System analysis of microbiological water treatment. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2024; 11(1): 08INOR124. Available at: <https://resources.today/PDF/08INOR124.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/08INOR124

Досаев Александр Алексеевич

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия

Аспирант

E-mail: a.dosaev93.muctr@mail.ru

Скичко Алексей Сергеевич

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: olf_1@list.ru

Системный анализ микробиологической очистки воды

Аннотация. Развитие мировой промышленной отрасли и увеличение объемов ее производств приводит к росту загрязнения окружающей среды, вследствие чего возникает необходимость разработки и внедрения принципиально новых методов очистки сточных вод на производственных объектах. Непременные условия внедрения новых методов очистки — экологическая чистота и их экономическая выгода. Известно, что данным критериям наиболее полно отвечают микробиологические методы очистки (основанные на способности микроорганизмов использовать неорганические и органические вещества, находящиеся в стоке, в качестве питательных субстратов). Разнообразие микроорганизмов, способных к эффективному удалению множества загрязняющих веществ из окружающей среды обуславливают появление колоссального числа научных исследований по тематике микробиологической очистки. Зависимость этих процессов от множества факторов, представляющих большой объем поступающей разнородной информации, усложняет исследовательские задачи, вследствие чего возникает проблема структуризации, хранения и обработки внушительных объемов данных, которая не теряет своей актуальности на сегодняшний день. Создание информационной системы по микробиологической очистке воды способно привести к эффективному решению проблемы накопления и структуризации больших объемов данных по данной тематике. В текущей работе авторами решена первостепенная задача разработки информационной системы по микробиологической очистке — выполнен анализ предметной области микробиологической очистки и сформировано ее описание (определены ключевые сущности). Разработана классификационная схема элементов предметной области, с помощью предложенных уникальных атрибутов — характеристик каждого элемента. На основе атрибутов были построены взаимосвязи между

сущностями с целью повышения эффективности их функционирования, что способствует дальнейшей разработке информационной системы по микробиологической очистке.

Ключевые слова: системный анализ; системный подход; микробиологическая очистка воды; сточные воды; загрязнение окружающей среды; разработка классификационной схемы; проектирование информационной системы

Введение

Развитие промышленной отрасли и увеличение объемов ее производств приводит к росту загрязнения окружающей среды (в том числе водных источников). Отходы, сбрасываемые с предприятий, попадая в грунтовые воды, оказывают негативное воздействие на здоровье людей, вследствие чего, возникает острая необходимость разработки и внедрения принципиально новых методов и технологий очистки стоков на производственных объектах.¹ Непременные условия внедрения — их экологическая чистота и экономическая выгода [1]. Известно, что данным критериям наиболее полно отвечают микробиологические методы очистки [2; 3]. Стоит отметить обширность сфер человеческой деятельности, где в настоящее время могут быть эффективно применены рассматриваемые процессы. Примерами являются: медицина, сельское хозяйство, различные производственные и эксплуатационные области [4; 5]. Разнообразие микроорганизмов, способных к эффективному удалению множества загрязняющих веществ из различных источников окружающей среды (за счет соответствующих биохимических процессов), обуславливают появление колоссального числа научных исследований по тематике микробиологической очистки [5; 6]. Зависимость этих процессов от множества факторов (температуры, водородного показателя pH, компонентов питательной среды, начальной концентрации загрязнителя, толщины клеточной мембраны и т. д.), представляющих большой объем поступающей разнородной информации, усложняет исследовательские задачи, вследствие чего возникает проблема структуризации, хранения и обработки внушительных объемов данных (а также получения быстрого и простого доступа к ним), которая не теряет своей актуальности на сегодняшний день [7]. В качестве решения проблемы предложено создание информационной системы, позволяющей быстро находить необходимые данные, а также, оперативно вносить результаты новых исследований.

Как известно, анализ предметной области и формирование ее описания (определение ключевых сущностей и установление правильного взаимодействия между ними) является первостепенной задачей при разработке информационной системы, выполнение которой является целью данной работы.² Системный анализ, применяемый для решения задачи, обобщает в себе методологию исследований сложных природных, технических и социальных систем и ориентирован на их изучение с использованием современных компьютерных средств [8]. Область микробиологической очистки, при представлении в качестве объекта системного анализа, является сложноорганизованной структурой с большим количеством влияющих факторов [6].

¹ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году», Министерство природы РФ, 2023, Москва. — URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022/ (дата обращения: 29.02.2024).

² Меньшутина Н.В. Современные информационные системы хранения, обработки и анализа данных для предприятий химической и смежных отраслей: учебное пособие / Н.В. Меньшутина, А.В. Матасов // Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева. — 2011. — 307 с.

Научная новизна данной работы заключается в предложенной классификационной схеме элементов микробиологической очистки (с целью повышения эффективности их функционирования) в рамках дальнейшего проектирования информационной системы.

Схема была разработана с использованием системного подхода, выбранного в качестве ключевого, за счет своей универсальности при моделировании множества сложных систем.

1. Материалы и методы

Системный подход, как известно, предполагает в себе выявление основных (взаимосвязанных) элементов из объекта исследования (что отличает его от индуктивного подхода, подразумевающего независимую разработку компонентов системы). Стоит отметить, что выделенные элементы должны наиболее точно фиксировать целостные свойства рассматриваемого объекта (микробиологической очистки), его структуру и динамику [9; 10].

Для этого необходим анализ предметной области, согласно которому, выяснено, что любое загрязняющее вещество потребляется микроорганизмами в процессах дыхания и жизнедеятельности (или связывается с поверхностью клеток), тем самым осуществляется процесс очистки, механизм протекания которого (с образованием метаболитов разного типа) определяет наличие у клетки тех или иных ферментов — биокатализаторов.

Также в анализируемой области стоит выделить основную тематику научных исследований (для более полного понимания, какие в ней данные фигурируют). Большая часть работ посвящена поиску, характеристике и оптимизации процессов биоочистки в различных средах и условиях, для чего, также, проводятся исследования по выделению, изучению и модификации множества микроорганизмов, и анализу их взаимодействия в консорциумах [11]. Важными являются работы по получению клеточных ферментов, изучению их физико-химических свойств, влияющих на механизм процесса очистки (в том числе на метаболический путь) [12]. Интересны труды по подбору такого пути протекания процесса, чтобы метаболиты можно было использовать в дальнейшем в различных сферах деятельности человека [13].

На основе представленного анализа предметной области стоит выделить следующие ее ключевые элементы (сущности), представляющие наиболее выраженный научный интерес: «Загрязнитель», «Микроорганизмы», «Процесс очистки», «Метаболиты» и «Ферменты». Построение правильного взаимодействия между данными элементами (в том числе, с помощью определения характеристик — атрибутов каждой выделенной единицы) необходимо для дальнейшего проектирования информационной системы.

2. Результаты и обсуждение

Основными результатами проведенного системного анализа является установление взаимосвязей между выделенными ключевыми сущностями информационного объекта «Микробиологическая очистка».

Сущность «Процесс очистки» будет служить объектом связкой между остальными выделенными элементами сложной системы. В качестве ключевых способов очистки, составляющих характеристику сущности «Процесс очистки» рассматриваются: биоремедиация (комплекс методов очистки с использованием метаболического потенциала биологических объектов); биоаккумуляция (процесс биологического поглощения элементов клеткой с накоплением их в цитоплазме); биосорбция (процесс, происходящий на поверхности клеточных структур по механизмам адсорбции, ионного обмена и хелатообразования) [14];

биотрансформация (преобразование одного химического вещества в другое в результате произошедшей в микроорганизме биохимической реакции) [15]; биоразложение (разрушение различных сложных веществ до простых молекул — H₂O, CH₄, CO₂, NH₃, H₂ и т. д. [16]; биоминерализация (совокупность биохимических процессов образования неорганических твердых веществ в живых организмах) [17]; биодеструкция (совокупность разрушающих материал биохимических процессов, вызванных действием микроорганизмов) [18].

Являясь уникальной единицей объекта системного анализа, которую характеризуют все остальные компоненты, элемент «Процесс очистки» выбран связующим, на основе чего построены следующие взаимосвязи:

1. Загрязняющие вещества, в зависимости от своего типа и области загрязнения, могут быть удалены с использованием различных процессов микробиологической очистки, которые, в свою очередь, могут быть реализованы множеством микроорганизмов (бактерии, грибы, дрожжи, водоросли), что представлено на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема взаимосвязи базовых информационных объектов «Загрязнитель» → «Микроорганизмы» (разработана авторами)

Для более полного раскрытия взаимосвязи информационных объектов «Загрязнитель» → «Микроорганизмы», предложено характеризовать сущность «Микроорганизмы» не только по атрибуту «Тип микроорганизма», но и по атрибуту «Технологическая форма», для которого предложена следующая классификация: «чистые культуры» (один вид микроорганизма), «смешанные консорциумы» (различные природные ассоциации, например, грибы-бактерии), «генно-модифицированные микроорганизмы» (клетки с искусственно измененным геномом) и «объединенные комплексы» (бактерии совместно с катализаторами, гранулами и т. д.). От данной характеристики зависит возможность и эффективность протекания того или иного процесса биоочистки. В качестве примера можно привести ключевую роль грибов в процессах биосорбции [19], эффективность биоразложения стойких органических загрязнителей консорциумами микроводорослей и бактерий [20].

Важным также является предложенный атрибут «Область загрязнения». Известно, что в зависимости от сферы деятельности промышленные отходы имеют многообразную химическую природу, вследствие которой оказывают различное влияние как на микроорганизмы, так и на осуществляемые ими процессы очистки. В качестве примера укажем ингибирование скорости

биоразложения красителя «Acid Orange 7» (являющегося отходом кожевенного завода), вследствие токсического воздействия загрязнителя на штамм *Bacillus cereus RMLAU1*. Данный пример указывает на то, что при подборе микроорганизмов для очистки, необходимо также руководствоваться технологической схемой производства, которая определяет состав образующихся отходов [21].

2. Разнообразные технологические формы микроорганизмов, осуществляют тот или иной процесс очистки, в зависимости от наличия ферментов различного типа катализируемой реакции и в зависимости от реакции на условия среды (рис. 2).



Рисунок 2. Схема взаимосвязи базовых информационных объектов «Микроорганизмы» → «Ферменты» (разработана авторами)

Одной из ключевых характеристик, влияющих на выбор механизма, по которому будет протекать биоочистка, является сущность «Ферменты». Каждый клеточный микроорганизм обладает уникальным набором ферментов — ферментативным аппаратом.

Известно, что по своей природе ферменты являются белками, выполняют роль биокатализаторов (повышают скорость химических реакций) во всех клеточных процессах (в том числе питания и дыхания).³ Атрибут «Тип катализируемой реакции» (например, окислительно-восстановительные реакции осуществляются редуктазами; реакции изомеризации — изомеразы и т. д.) определяет механизм протекания микробиологической очистки.

Помимо характеристики сущности «Ферменты» по типу катализируемой реакции можно констатировать, что важной особенностью взаимосвязи является атрибут «Реакция на условия среды». Существуют ферменты, как синтезируемые только при наличии в среде необходимого субстрата (индукцибельные), так и постоянно присутствующие в клетках вне зависимости от него (конститутивные). Установлено, что оба вида ферментов участвуют в процессах биоочистки. Примером может служить биоразложение углеводов бактериями с использованием конститутивных (внутриклеточных липаз) и индукцибельных (внеклеточных катализ) ферментов [22].

³ Несвижский Ю.В. Микробиология: учебное пособие / Ю.В. Несвижский, Е.В. Буданова, Д.Н. Нечаев, Г.Н. Усатова, Е.П. Ананьева, С.В. Гурина, А.С. Быков // "ГЭОТАР-Медиа". — 2022. — 616 с.

Для построения взаимосвязи «Ферменты» → «Загрязнитель» предложен атрибут «Связь с клеткой». Существуют ферменты, выделяемые клеткой в среду загрязнения — экзоферменты. Они служат катализаторами реакций разложения сложных соединений до простых, для дальнейшего усвоения клеткой. Внутриклеточные процессы осуществляются с помощью эндоферментов. Таким образом, следует выделить следующую взаимосвязь:

3. Ферменты катализируют тот или иной процесс биоочистки в зависимости от структуры вещества, попавшего в среду загрязнения (Схема взаимосвязи не показана в связи с ее громоздкостью).

4. В зависимости от наличия у клетки того или иного набора ферментов, процессы микробиологической очистки могут протекать по разному метаболическому пути. Это безусловно, влияет на химическую природу образующихся продуктов — метаболитов (схема взаимосвязи «Ферменты» → «Метаболиты» не приведена).

5. Загрязнители, в зависимости от протекающих с ними клеточных превращений (накопление, разрушение, разложение, трансформация или сложный комплекс процессов), способны как понижать [23], так и повышать токсичность среды [24], за счет выделения продуктов — различных метаболитов (рис. 3).



Рисунок 3. Схема взаимосвязи базовых информационных объектов «Загрязнитель» → «Метаболиты» (разработана авторами)

Сущность «Метаболиты» помимо показателя токсичности предложено классифицировать в зависимости от участия метаболитов в основном клеточном обмене. Первичными являются те, которые используются микроорганизмами в процессах жизнедеятельности. Вторичными называют конечные продукты первичного метаболизма, не используемые клетками в дальнейшем.³ Также для наиболее полной характеристики сущности «Микроорганизмы» определен атрибут «Тип дыхания». Известно, что микроорганизмы по типу дыхания подразделяются на «аэробные» (синтез энергии с использованием кислорода) и «анаэробные» (без использования кислорода).³ Установлено, что тип дыхания микроорганизма оказывает непосредственное влияние на метаболический путь [25]. В качестве примеров можно привести: анаэробное биоразложение фенола до 4-гидроксibenзоата с помощью *Clostridium hydroxybenzoicum* и аэробное биоразложение штаммом *Bacillus cereus ZWB3* до органических

кислот (уксусной, янтарной и пировиноградной) [26; 27]. На основе данной классификации строится взаимосвязь «Метаболиты» → «Микроорганизмы» (схема не представлена).

Итогом проведенного анализа области микробиологической очистки, выделения в ней ключевых элементов, а также характерных им атрибутов и установленных между ними взаимосвязей служит разработанная классификационная схема, представленная на рисунке 4.

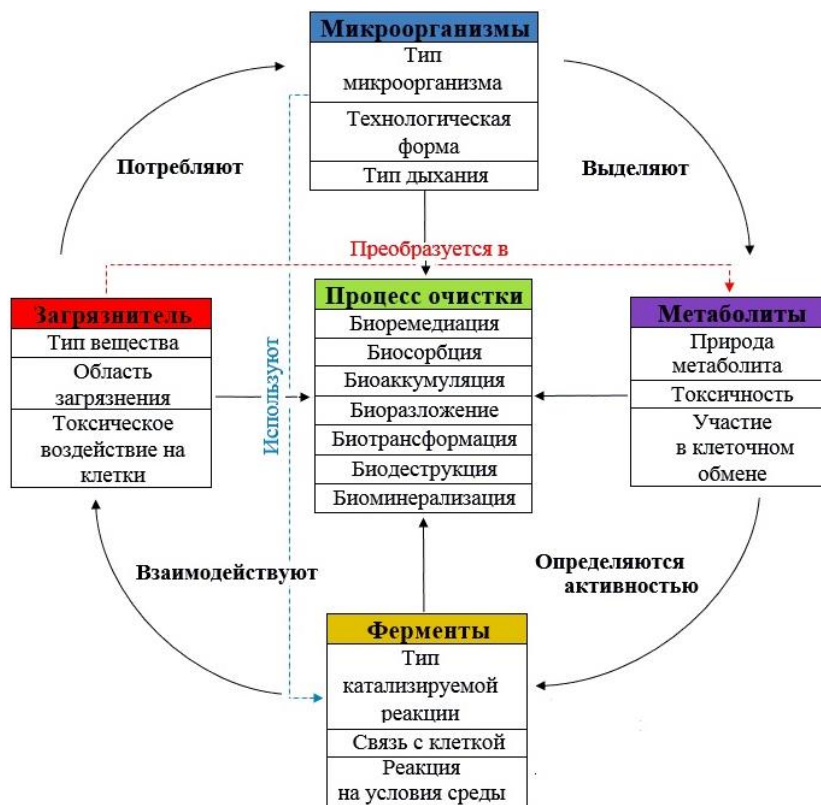


Рисунок 4. Классификационная схема области микробиологической очистки (разработана авторами)

В работе решена первостепенная задача разработки информационной системы по микробиологической очистке — выполнен анализ предметной области микробиологической очистки и сформировано ее описание (определены ключевые сущности). Разработана классификационная схема предметной области с помощью предложенных уникальных атрибутов — характеристик каждого элемента. На основе атрибутов были построены взаимосвязи между сущностями с целью повышения эффективности их функционирования. Предложенная классификационная схема (наиболее полно и связно отражающая область микробиологической очистки) лежит в основе дальнейшей разработки информационной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зотов Е.А. Очистка водных ресурсов от истощения и загрязнения / Е.А. Зотов // Проблемы и основные направления развития высшего технического образования: сборник статей VIII межвузовской международной студенческой конференции, Воронеж, 30 января 2022 года / Воронеж: филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Ростовский государственный университет путей сообщения", 2020. — С. 130–134. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48290533> (дата обращения: 04.02.2024).

2. Sharma P. Trends in mitigation of industrial waste: Global health hazards, environmental implications and waste derived economy for environmental sustainability / P. Sharma, V.K. Gaur, S. Gupta, S. Varjani, A. Pandey, E. Gnansounou, S. Huu, H.H. Ngo, J.W. Wong — DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2021.152357 // Science of The Total Environment. — 2022. — Vol. 811. — С. 152357. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721074349> (дата обращения: 04.02.2024).
3. Singh A., Singh A. Microbial Degradation and Value Addition to Food and Agriculture Waste / A. Singh, A. Singh — DOI: 10.1007/s00284-022-02809-5 // Current Microbiology. — 2022. — Т. 79. — № 4. — С. 1–17. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00284-022-02809-5> (дата обращения: 04.02.2024).
4. Kochhar N. Current Research in Microbial Sciences / N. Kochhar, I.K. Kavya, S. Shrivastava, A. Ghosh, V.S. Rawat, K.K. Sodhi, M. Kumar — DOI: 10.1016/j.crmicr.2022.100134 // Current Research in Microbial Sciences. — 2022. — Т. 3. — С. 100134. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666517422000311> (дата обращения: 04.02.2024).
5. Созина И.Д. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв / И.Д. Созина, А.С. Данилов // Записки Горного института. — 2023. — № 260. — С. 297–312. — URL: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15837?setLocale=ru_RU (дата обращения: 04.02.2024).
6. Mustafa S. Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities / S. Mustafa, H.N. Bhatti, M. Maqbool, M. Iqbal — DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102009 // Journal of Water Process Engineering. — 2021. — Т. 41. — С. 102009. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714421000969> (дата обращения: 04.02.2024).
7. Pham V.H.T. Bacterial biosorbents, an efficient heavy metals green clean-up strategy: Prospects, Challenges, and Opportunities / V.H.T. Pham, J. Kim, S. Chang, W. Chung — DOI: 10.3390/microorganisms10030610 // Microorganisms. — 2022. — Т. 10. — № 3. — С. 610. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/10/3/610> (дата обращения: 04.02.2024).
8. Кафаров В.В. Моделирование и системный анализ биохимических производств / В.В. Кафаров, А.Ю. Винаров, Л.С. Гордеев // Лесная промышленность. — 1985. — 344 с.
9. Будылина Е.А. Междисциплинарные исследования в конструировании сложных систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. — 2021. — № 3. — С. 106–113. — URL: <https://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/3122/176%20Nomer%2049.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 04.02.2024).
10. Савдур С.Н. Системный подход в моделировании технологического процесса очистки нефтесодержащих сточных вод / С.Н. Савдур, С.А. Понкратова // Вестник Казанского технологического университета. — 2010. — № 7. — С. 218–226. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15206139> (дата обращения: 04.02.2024).

11. de Andrade F.P. Consortium between microalgae and other microbiological groups: A promising approach to emphasise the sustainability of open cultivation systems for wastewater treatment / F.P. de Andrade, C.E. de Farias Silva, J.A. Medeiros, R.C. Vieira, M.L.F. de Sá Filho, G.K.S. Santos — DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103211 // Journal of Water Process Engineering. — 2022. — Т. 50. — С. 103211. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714422006559> (дата обращения: 04.02.2024).
12. Gao Y. Immobilized fungal enzymes: Innovations and potential applications in biodegradation and biosynthesis / Y. Gao, K. Shah, I. Kwok, M. Wang, L.H. Rome, S. Mahendra — DOI: 10.1016/j.biotechadv.2022.107936 // Biotechnology Advances. — 2022. — Т. 57. — С. 107936. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975022000325> (дата обращения: 04.02.2024).
13. Белов Д.В. Перспективы переработки пластиковых отходов на основе полиэтиленгликольтерефталата с применением живых систем (обзор) / Д.В. Белов, С.Н. Беляев — DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-238-253 // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. — 2022. — Т. 12. — № 2(41). — С. 238–253. — URL: <https://vuzbiochemi.elpub.ru/jour/article/view/809/431> (дата обращения: 04.02.2024).
14. Переломов Л.В. Молекулярные механизмы взаимодействия между микроэлементами и микроорганизмами в биокосных системах (биосорбция и биоаккумуляция) / Л.В. Переломов, И.В. Переломова, Д.Л. Пинский // Агрохимия. — 2013. — № 3. — С. 80–94. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18962631> (дата обращения: 04.02.2024).
15. Kennes-Veiga D.M. Enzymatic cometabolic biotransformation of organic micropollutants in wastewater treatment plants: A review. / D.M. Kennes-Veiga, L. González-Gil, M. Carballa, J.M. Lema — DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126291 // Bioresource Technology. — 2022. — Т. 344(B). — С. 126291. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421016333> (дата обращения: 04.02.2024).
16. Васендин Д.В. Потенциал биологических агентов в обеззараживании почв при загрязнении токсичными химическими веществами / Д.В. Васендин — DOI: 10.33764/2618-981X-2022-3-3-9 // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — Т. 3. — С. 3–9. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49367112> (дата обращения: 04.02.2024).
17. Чепелева К.В. Технологии биоминерализации: возможности и перспективы использования / К.В. Чепелева, О.С. Никитина, А.С. Банникова, К.В. Сиротская // Эпоха науки. — 2016. — № 8. — С. 158–162. — URL: http://eraofscience.com/EofS/Vypyski2016/8IIZMNPk/8-dekabr_2016.pdf#page=166 (дата обращения: 04.02.2024).
18. Пехташева Е.Л. Биодеструкция и биоповреждения материалов. Кто за это в ответе? / Е.Л. Пехташева, А.Н. Неверов, Г.Е. Заиков, О.В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. — 2012. — № 8. — С. 222–233. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17700431> (дата обращения: 04.02.2024).

19. Рахал З. К вопросу о биосорбции тяжелых металлов на растительных сорбентах / З. Рахал, Х. Чекима // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 79-ой всероссийской научно-технической конференции, Самара, 18–22 апреля 2022 года / Самара: Самарский государственный технический университет, 2022 — С. 654–661. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_49012923_30905282.pdf (дата обращения: 04.02.2024).
20. Chan S.S. Recent advances biodegradation and biosorption of organic compounds from wastewater: Microalgae-bacteria consortium-A review / S.S. Chan, K.S. Khoo, K.W. Chew, T.C. Ling, P.L. Show — DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126159 // Bioresource Technology. — 2022. — Т. 344. — С. 126159. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421015017> (дата обращения: 04.02.2024).
21. Garg S.K. Process parameters for decolorization and biodegradation of orange II (Acid Orange 7) in dye-simulated minimal salt medium and subsequent textile effluent treatment by *Bacillus cereus* (MTC 9777) RMLAU1 / S.K. Garg, M. Tripathi — DOI: 10.1007/s10661-013-3223-2 // Environmental monitoring and assessment. — 2013. — Т. 185. — № 11. — С. 8909–8923. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-013-3223-2> (дата обращения: 04.02.2024).
22. Рябцева Н.Д. Изучение каталитических процессов микробного окисления нефтяных углеводородов / Н.Д. Рябцева, В.С. Никитина, М.И. Абдуллин, Р.Ф. Багаутдинов, А.А. Кадиров // Вестник Башкирского университета. — 2016. — Т. 21. — № 2. — С. 308–313. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26633124> (дата обращения: 04.02.2024).
23. Thangaraj S. Biodegradation of Reactive Red 198 by textile effluent adapted microbial strains / S. Thangaraj, P.O. Bankole, S.K. Sadasivam, V. Kumarvel — DOI: 10.1007/s00203-021-02608-9 // Archives of Microbiology. — 2022. — Т. 204. — № 1. — С. 1–13. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00203-021-02608-9> (дата обращения: 04.02.2024).
24. Agrawal N. Biodegradation and detoxification of phenanthrene in in vitro and in vivo conditions by a newly isolated ligninolytic fungus *Coriolopsis byrsina* strain APC5 and characterization of their metabolites for environmental safety / N. Agrawal, V. Kumar, S.K. Shahi — DOI: 10.1007/s11356-021-15271-w // Environmental Science and Pollution Research. — 2022. — Т. 29. — № 41. — С. 61767–61782. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-15271-w> (дата обращения: 04.02.2024).
25. Хоменков В.Г. Организация метаболических путей и молекулярно-генетические механизмы биодegradации ксенобиотиков у микроорганизмов (обзор) / В.Г. Хоменков, А.Б. Шевелёв, В.Г. Жуков, Н.А. Загустина, А.М. Безбородов, В.О. Попов // Прикладная биохимия и микробиология. — 2008. — Т. 44. — № 2. — С. 133–152. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9934650> (дата обращения: 04.02.2024).

26. Tomei M.C. Anaerobic biodegradation of phenol in wastewater treatment: achievements and limits / M.C. Tomei, D. Mosca Angelucci, E. Clagnan, L. Brusetti — DOI: 10.1007/s00253-021-11182-5 // Applied Microbiology and Biotechnology. — 2021. — Т. 105(6). — С. 2195–2224. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-021-11182-5> (дата обращения: 04.02.2024).
27. Zhang J. A study of highly efficient phenol biodegradation by a versatile Bacillus cereus ZWB3 on aerobic condition / J. Zhang, X. Zhou, Q. Zhou, J. Zhang, J. Liang — DOI: 10.2166/wst.2022.209 // Water Science and Technology. — 2022. — Т. 86. — № 2. — С. 355–366. — URL: <https://iwaponline.com/wst/article/86/2/355/89620/A-study-of-highly-efficient-phenol-biodegradation> (дата обращения: 04.02.2024).

Dosaev Aleksandr Alekseevich

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia
E-mail: a.dosaev93.muctr@mail.ru

Skichko Aleksey Sergeevich

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia
E-mail: olf_1@list.ru

System analysis of microbiological water treatment

Abstract. The development of the global industrial sector and the increase in the volume of its production leads to an increase in environmental pollution, as a result of which there is a need to develop and implement fundamentally new methods of wastewater treatment at production facilities. Prerequisites for the introduction of new cleaning methods are environmental friendliness and their economic benefits. It is known that these criteria are most fully met by microbiological treatment methods (based on the ability of microorganisms to use inorganic and organic substances found in the runoff as nutrient substrates). The diversity of microorganisms capable of effectively removing many pollutants from the environment determines the emergence of a colossal number of scientific studies on the topic of microbiological purification. The dependence of these processes on many factors, representing a large volume of incoming heterogeneous information, complicates research tasks, resulting in the problem of structuring, storing and processing impressive volumes of data, which does not lose its relevance today. The creation of an information system for microbiological water purification can lead to an effective solution to the problem of accumulating and structuring large volumes of data on this topic. In the current work, the authors have solved the primary task of developing an information system for microbiological purification — an analysis of the subject area of microbiological purification has been carried out and its description has been formed (key entities have been identified). A classification scheme for elements of the subject area has been developed using the proposed unique attributes — characteristics of each element. Based on the attributes, relationships between entities were built in order to improve the efficiency of their functioning, which contributes to the further development of an information system for microbiological purification.

Keywords: system analysis; systems approach; microbiological water purification; wastewater; environmental pollution; development of a classification scheme; information system design