

Использование физиолого-биохимического отклика микроорганизмов на действие токсикантов в биотестировании

© 2017. А. И. Фокина, к. б. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,
e-mail: annushka-fokina@mail.ru

В обзоре рассматриваются современные тенденции использования метаболических реакций микроорганизмов (МО) на действие различных токсикантов в методиках биотестирования. Отмечено использование таких биохимических показателей, как ферментативная активность, интенсивность биомилюминесценции (БХЛ), перекисное окисление липидов (ПОЛ), состояние пигментного комплекса, выделение экзо- и эндометаболитов (азот-, серосодержащих соединений, органических кислот, полисахаридов и т. д.), способствующих детоксикации поллютантов. Совершенствование методик биотестирования направлено в сторону усиления таких их характеристик, как автоматизация, экономичность и экспрессность, использование чувствительных, способных к специфичной и/или интегральной ответной реакции МО. Процесс автоматизации методик направлен на создание биоаналитических устройств (биосенсоры) и их миниатюрных аналогов – биочипов, в которых в качестве чувствительного элемента используют неразрушенные живые клетки МО. Такая организация биосенсоров позволяет повысить экономичность их использования. Наибольшее распространение нашли биосенсоры оптического и электрохимического типов. Так как проявление аналитического эффекта при действии экотоксикантов на биохимические системы МО зависит от многих факторов, что может значительно затруднять интерпретацию результатов биотестирования, при разработке методик используют организмы, обладающие специфическим откликом на отдельные токсиканты или группы токсикантов. Большой прогресс в этом направлении достигнут при определении органических соединений: нафталина, фталатов и т. д. Имеются подобные разработки для определения тяжёлых металлов (ТМ). Несмотря на то, что современной тенденцией при разработке методик биотестирования является использование специфичных реакций МО на действие токсикантов, определение интегральной токсичности (традиционный подход) объектов окружающей среды, благодаря необходимости оценки степени их токсичности в целом, остаётся актуальным и востребованным.

Ключевые слова: биохимические показатели, микроорганизмы, токсикант, тест-функции, микробиологическая диагностика.

The use of physiological and biochemical reactions of microorganisms on the action of toxicants in bioassay

A. I. Fokina,
Vyatka State University,
36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: annushka-fokina@mail.ru

This review discusses the current trends in the use of the metabolic reactions of microorganisms (MO) to the effect of various toxicants in bioassay techniques. The use of such biochemical indicators as enzymatic activity, the intensity of bioluminescence (BHL), lipid peroxidation (LPO), the state of the pigment complex, the release of exo- and endo-metabolites (nitrogen, sulfur compounds, organic acids, polysaccharides, etc.) contribute to detoxification of pollutants. Improvement of bioassay techniques aims at strengthening their characteristics, such as automation, economy and speed, the use of sensitive MO, capable of specific and/or integral response. The process of automation of the techniques aims at creation of bioanalytical devices (biosensors) and their miniature analogues – biochips, in which intact alive MO cells are used as a sensitive element. Such organization of biosensors allows to increase the economy of their use. The most widely used biosensors are the ones of optical and electrochemical types. Since manifestation of the analytical effect under the ecotoxicants action on the biochemical systems of MO depends on many factors, which can significantly complicate the interpretation of the results of bioassay, then during the development of techniques such organisms are used, which have a specific response to individual toxicants or groups of toxicants. Great progress in this direction was made in determining organic compounds: naphthalene, phthalates, etc. There are similar developments for determination of heavy metals

(НМ). Despite the fact that the current trend in development of bioassay methods is the use of specific MO responses to toxicants, determination of the integrated toxicity (traditional approach) of environmental objects, due to the need to assess the degree of their toxicity in general, remains relevant and in demand.

Keywords: biochemical parameters, microorganisms, toxicant, test-functions, microbiological diagnostics.

Использование физиолого-биохимического отклика микроорганизмов (МО) на действие токсикантов давно вошло в практику экологического мониторинга. Спектр изучаемых и используемых в качестве тест-функций показателей широк, однако можно выделить основные из них.

Показатели физиолого-биохимических реакций как тест-функции

Существует много литературных данных, посвящённых результатам исследования влияния токсикантов на метаболизм МО. Учёные отмечают наличие ответной реакции ферментативных систем МО [1–3]. Так, например, под действием поллютантов изменяется дегидрогеназная активность. Сущность метода биотестирования, в основе которого лежит изучение изменения дегидрогеназной активности, состоит в том, что в живых клетках 2,3,5-трифенилтетразолий хлорид (ТТХ), акцептируя мобилизованный дегидрогеназой водород, превращается в кристаллы 2,3,5-трифенилформазана, имеющие красную или малиновую окраску. Результат указанной реакции в популяциях цианобактерий (ЦБ) можно наблюдать под микроскопом, дифференцируя клетки с кристаллами формазана, учитывая их как жизнеспособные, и клетки без формазана, считая их погибшими после воздействия токсикантов. Токсичными считают варианты, в которых доля клеток с кристаллами не превышает 50% [4].

Чувствительным показателем на действие ионов ТМ является активность каталазы. Установлено, что при действии в течение суток на биоплёнку с доминированием ЦБ рода *Phormidium* ионов Cu^{2+} (20 мг/дм³) активность каталазы изменяется в 5 раз, активность дегидрогеназы – почти в 357 раз, что можно использовать в качестве тест-функций при биотестировании [5].

Одним из самых распространённых показателей, используемых как для оценки специфического отклика на действие токсикантов, так и при определении интегральной (неспецифической) токсичности, является явление биолюминесценции (экологическая люминиметрия) [6]. Биолюминесценция – частный

случай хемилюминесценции, катализируемой биологическими катализаторами – ферментами люциферазами. Фермент люцифераза – смешанная оксидаза окисляет длинноцепочечные альдегиды до карбоновых кислот, восстанавливая флавиномононуклеотид (ФМН), при этом происходит испускание голубовато-зелёного света. Интенсивность испускания зависит от уровня метаболизма и целостности клеток МО [7], которые, в свою очередь, зависят от действия экотоксикантов. Для определения специфической токсичности используют активность свечения мутантов или генно-инженерных штаммов со встроенным комплексом сенсорных и люминесцентных генов, об интегральной токсичности судят по уровню тушения свечения в природных штаммах микроорганизмов. Отмечена зависимость между интенсивностью БХЛ почвенных ЦБ и концентрацией ионов ТМ в растворе, в частности, ионов Cu^{2+} . Так, например, интенсивность БХЛ природных штаммов почвенных цианобактерий рода *Phormidium* при действии Cu^{2+} (2 мг/дм³) в течение суток уменьшается в 1,3–100 раз, в вариантах с большей концентрацией Cu^{2+} (20 мг/дм³) в 8,6–200 раз, что можно использовать в качестве тест-функций при биотестировании [5]. Данным методом удаётся установить наличие токсичности растворов с концентрацией ионов металлов менее ПДК в воде питьевого назначения [8, 9]. Предложена методика определения токсичности водных вытяжек из галитовых отходов и глинисто-солевых шламов, образующихся при производстве калийных удобрений, по снижению уровня флуоресценции хлорофилла морской водоросли *Phaeodactylum tricornerutum* [10]. Бактерии, экспрессирующие флуоресцентный белок, в клеточной суспензии могут быть детектированы с использованием обычного флуориметра, а на уровне одной клетки – методами эпифлуоресцентной микроскопии и проточной цитофлуориметрии [11, 12]. Несмотря на большое распространение методик биотестирования, в основу которых легло явление биолюминесценции, их применение может быть затруднительно. Сложность обусловлена тем, что на зависимость «доза токсиканта – интенсивность люминесценции» влияет множество факторов, начиная от приро-

ды излучения, заканчивая присутствием посторонних веществ и т. д. Например, в процесс появления аналитического сигнала может вмешаться концентрационное тушение люминесценции: тривиальная абсорбция, когда одна молекула испускает квант света, другая его поглощает, гасит; ингибирование биолюминесценции за счёт процесса связывания посторонних соединений с активными центрами фермента или взаимодействие с субстратами реакции. Распространены случаи, когда сходные по строению токсиканты проявляют противоположное действие. Примером является действие солей d-металлов. Катионы с зарядом 2^+ с вакантными d-орбиталями (Mn^{2+} , Co^{2+} и Ni^{2+}) активируют биолюминесценцию светящихся бактерий, а катионы без вакантных d-орбиталей (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} и Hg^{2+}) ингибируют её [13]. Поэтому результаты биолюминесцентного анализа с использованием МО могут быть достаточно противоречивы, а его использование затруднено.

Ответной реакцией на действие токсикантов является изменение перекисного окисления липидов (ПОЛ), окислительная деградация липидов под действием свободных радикалов, активаторами которых могут быть ионы ТМ, токсиканты органической природы и т. д. [14]. Так, у биоплёнок с доминированием ЦБ рода *Phormidium* после контакта в течение часа с ионами Cu^{2+} (20 мг/дм^3) усиливается ПОЛ. Через сутки экспозиции МО адаптируются, о чём свидетельствует снижение интенсивности ПОЛ [15]. Активация ПОЛ является ранней ответной реакцией на стресс-факторы [16, 17].

В качестве показателя окислительного стресса может также служить количество карбонильных групп в белках как одного из общепринятых критериев окислительного стресса [18, 19].

Различные токсиканты влияют на пигментный комплекс МО. Предполагают, что механизм воздействия основан на дестабилизации белково-пигментного комплекса, что нарушает функционирование пигментных систем [20].

В ответ на действие поллютантов как неорганической, так и органической природы, МО могут выделять азотсодержащие соединения [21], экзополисахариды [22, 23], глутатион [24–27], органические кислоты [28], образование которых способствует детоксикации веществ благодаря наличию функциональных групп, связывающих токсиканты.

Таким образом, результаты изучения физиолого-биохимического отклика перспек-

тивны для характеристики МО и для решения прикладных задач, в том числе в экомониторинге, как сигнал о присутствии экотоксикантов, а сила сигнала – количественная характеристика токсичности.

Совершенствование методик биотестирования направлено в сторону усиления таких их характеристик, как автоматизация, экономичность и экспрессность, использование чувствительных, способных к специфичной и/или интегральной ответной реакции МО.

Автоматизация методов биотестирования

Автоматизация может затрагивать как один из этапов биотестирования (регистрацию сигнала, обработку результатов, интерпретацию результатов и т. п.), так и ряд этапов одновременно. Процесс автоматизации позволяет внедрять методы биотестирования в поточные анализы и значительно повышать объективность исследований. Поэтому последние 35 лет отмечены всплеском в области развития биосенсоров. Вопросы возможности и перспектив практического использования микробных биосенсоров для анализа широкого круга веществ освещены в работе [29].

Биосенсоры – биоаналитические устройства, позволяющие использовать высокочувствительные методы измерения содержания химических соединений или биологических эффектов в образцах. Принцип детекции, реализованный в биосенсорах, основан на том, что биоматериал (ферменты, клетки, антитела и др.), иммобилизованный на физическом датчике (преобразователе), при взаимодействии с определяемым соединением генерирует зависимый от его концентрации сигнал, который регистрируется преобразователем электрохимического, оптического или иного типа и после обработки данных представляется в численном виде. Свойство биологических макромолекул селективно и с высокой чувствительностью «узнавать» различные соединения делает возможным создание биосенсоров для анализа широкого спектра веществ. Простота устройства, оперативность, специфичность и низкая стоимость биосенсорного анализа создают высокую степень приоритета дальнейшему развитию этой области аналитической биотехнологии [30]. При создании биосенсора, особенно для решения экологических задач, необходимо учитывать такие важные параметры, как лёгкость и скорость выявления детектируемого соединения, экономическая

эффективность, чувствительность этого инструмента, его размеры и простоту эксплуатации [31, 32]. Больше распространение при разработке микробных сенсоров для экомониторинга нашли два типа преобразователей: электрохимические (амперометрические, потенциометрические, кондуктометрические) и оптические (на основе абсорбции, флуоресценции, люминесценции) [33]. Основное число публикаций посвящено разработкам с использованием микробных биосенсоров оптического типа [34]. Аналитическим сигналом в оптических биосенсорах может служить, например, изменение свечения под действием поллютантов. Примером использования электрохимического преобразователя может быть процесс регистрации в системе образующегося кислорода с помощью амперометрического датчика. Действие биосенсора данного типа основано на том, что изменение концентрации кислорода, регистрируемое при помощи электрода, позволяет судить о дыхательной активности иммобилизованных на поверхности электрода бактерий и, следовательно, о содержании окисляемых ими соединений [35]. Кроме оптических и электрохимических датчиков используют и другие устройства, например, хроматографические [36].

На первых этапах в качестве чувствительного элемента датчика использовали ферменты и компоненты клеток МО. Только в начале XXI века стали развиваться направления использования неразрушенных микробных клеток [37, 38]. Для оценки реального действия токсичных соединений на живые системы в качестве модельного объекта в биосенсорах часто применяют живые клетки различных организмов [40, 41]. Например, цельноклеточные биосенсоры способны дать информацию об основных процессах, происходящих в почве, и представляют собой беспрецедентно чувствительные инструменты мониторинга состояния почв [39]. Клетки бактерий, как правило, легко выращиваются в культуре, что обеспечивает их экономическое преимущество перед такими альтернативными биологическими компонентами, используемыми в современных биосенсорах, как ферменты и антитела [42].

Разработка специфичных тест-систем

Существенным минусом при экологической оценке состояния объектов окружающей среды является неоднозначность физиолого-биохимического отклика МО. К сожалению,

эта особенность свойственна практически всем биохимическим системам. Отчасти поэтому разрабатываются тест-системы, обладающие специфическим откликом на действие конкретных токсикантов, способных «узнавать» одно соединение в исследуемой среде [43–45]. Создание специфичных биосенсоров – это уникальное решение аналитических задач, таких как определение конкретных экотоксикантов в окружающей среде. Существуют биосенсоры группового определения, «узнающие» целую группу веществ, например, на основе *Escherichia coli* созданы биосенсоры чувствительные и специфичные к антибиотикам тетрациклинового ряда [46].

Обнаружение органических соединений

В последние годы разработано множество специфических биосенсоров для определения органических соединений. Органические соединения являются главными загрязнителями окружающей среды, и они стали основной мишенью развития цельноклеточных биосенсоров. В определении органических соединений активно развивается амперометрический метод. Суть заключается в том, что действие некоторых ксенобиотиков на аэробные МО приводит к изменению их дыхательной активности, обусловленной, в том числе, окислением органического токсиканта оксидоредуктазами МО с потреблением молекулярного кислорода. При этом с помощью амперометрического датчика, который находится вблизи чувствительного элемента (иммобилизованные МО), измеряется количество растворённого кислорода. Концентрация последнего зависит от концентрации органического соединения, вызывающего изменение метаболизма МО. Кроме того, при разработке биосенсоров на любой органический поллютант руководствуются тем, чтобы для штамма МО определяемый углеводород был единственным источником углерода, то есть штамм проявлял специфичность. Так, например, были разработаны детекторы для определения нафталина, бифенила, хлорированных бензоатов и т. п. В биосенсоре для деградации нафталина использовали бактерии *Pseudomonas putida*, несущие плазмиду его деградации. Процесс биодеградации осуществляется микробными оксигеназами и протекает с потреблением кислорода. На основе таких штаммов возможно создавать рецепторные элементы биосенсоров для детекции нафталина с использованием в качестве преобразователя кислородный электрод [47]. Установлено, что дрожжи р. *Arxula* и бактерии

р. *Gluconobacter* обеспечивают высокую чувствительность сенсоров к спиртам и сахарам. Значение биологического потребления кислорода (БПК), полученное стандартным методом разбавления, совпадает с индексом БПК, полученным при измерении биосенсорами на основе этих МО. Показано, что созданные лабораторные модели биосенсоров могут быть эффективно использованы для оперативной оценки БПК стоков пищевых производств [48]. Амперометрический подход реализуется при определении в водном растворе ди-(2-этилгексил)-фталата с помощью актинобактерий *Rhodococcus wratislaviensis* VKM Ac-2631 D [49], а штамм *Alcaligenes xylosoxydans* subsp. позволяет определить тиодигликоль [50]. Была создана лабораторная модель биосенсора, модифицированного штаммом бактерий р. *Pseudomonas*, являющихся деструкторами нефтяных углеводородов [51].

Разработана система, предназначенная для быстрого обнаружения и определения 2,4-динитрофенола и нитрита в водных растворах. Система содержит четыре биосенсора, преобразователями в которых являются погружённые в проточные ячейки электроды Кларка, в качестве биорецепторов первый и третий мембранные биосенсоры содержат иммобилизованные на носителе клетки бактерии *Rhodococcus erythropolis* HL PM-1, четвёртый мембранный биосенсор содержит иммобилизованные на носителе клетки бактерий *Nitrobacter vulgaris* DSM10236, второй биосенсор выполнен в виде реактора колоночного типа с иммобилизованными на носителе клетками бактерий *Rhodococcus erythropolis* HL PM-1, при этом электрод Кларка размещён на выходе реактора биосенсора, а проточные ячейки биосенсоров последовательно соединены между собой. Предложены также биосенсор для определения 2,4-динитрофенола (ДНФ) и биосенсор для определения нитрит-ионов. При определении 2,4-ДНФ и нитрита биосенсорная система обеспечивает высокую чувствительность и селективность, позволяет определять наличие данных веществ одновременно [52].

Использование кислородного датчика удобно не только для разработки биосенсоров, но и для физиолого-биохимической характеристики микроорганизмов.

Кроме электрохимических датчиков при определении органических веществ, ещё более широкое применение находят оптические сенсоры. Так, уже зарекомендовали себя оптические биосенсоры, основанные на определении интенсивности БХЛ.

Кроме биосенсоров оптического и амперометрического типов, существуют и другие варианты преобразователей аналитического сигнала МО. Например, изучено влияние углеродных наноматериалов (углеродные нанотрубки, терморасширенный и пиролитический графит) на биоэлектрохимическую активность бактериальных клеток *Gluconobacter oxydans* при сорбционном контакте с наноматериалами. Для иммобилизации бактерий поверхность рабочего биоэлектрода модифицировали, нанося на него суспензию бактерий в исследуемом наноматериале и хитозане. Оценивали биоэлектрохимические характеристики электрода (амплитуду генерируемого потенциала, циклические вольтамперные характеристики, сопротивление) до и в процессе взаимодействия бактерий с этиловым спиртом (3-электродная схема измерения). Модификация электрода из спектрального графита углеродными нанотрубками позволяла уменьшить сопротивление переноса заряда на 48% и увеличить ток окисления на циклических вольтамперных характеристиках при напряжении в 200 мВ на 21%, по сравнению с немодифицированным электродом. Данный приём можно использовать для увеличения чувствительности прибора и, соответственно, расширения области определяемых концентраций спирта [53].

Детекция токсичности среды, обусловленной солями тяжёлых металлов

Кроме биосенсоров, для определения показателей, связанных с органическими веществами, существует немало биосенсоров, предназначенных для детекции токсичности сред, обусловленных ТМ.

Попадание ионов металлов в клетки индуцирует синтез ферментов, необходимых для обеспечения резистентности клеток к токсическому действию. Основываясь на существовании механизмов резистентности, были разработаны специфические тест-системы для оценки содержания ионов в окружающей среде, например, ртути, хрома, кадмия, меди, алюминия, сурьмы, никеля, мышьяка. Существует биосенсор, содержащий клетки фотоавтотрофных микроводорослей, флуоресцентные характеристики фотосинтетической системы которых изменяются при появлении в их окружении соединений ТМ, обладающих цитотоксичным действием. Клетки зелёных и диатомовых водорослей иммобилизуют в криогеле поливинилового спирта: наносят клеточную суспензию на поверхность, затем вводят клетки в макропоры полимерного но-

сителя и получается высокочувствительный и стабильный биосенсор [54]. Выделены два перспективных для биотестирования штамма, идентифицированные генетическими методами до вида (*Vibrio fischeri* ВКПМ В-9579 и *V. fischeri* ВКПМ В-9580) и принятые на национальное патентное депонирование. Выделенные штаммы биOLUMИнесцентных бактерий отличаются высокой индивидуальной чувствительностью к солям ТМ (на уровне предельно допустимых концентраций для воды рыбохозяйственных водоёмов) [55].

При разработке биосенсоров изучают возможность реализации методики в условиях многокомпонентных систем. Например, при создании биосенсора для определения БПК исследуют влияние ионов ТМ на аналитический сигнал. Показано, что биосенсор, работа которого основана на окислительной способности *Debaryomyces hansenii*, устойчив к ингибирующему действию многих ионов ТМ. Факторами, ограничивающими работу биосенсора в довольно широких пределах, являются солёность (до 25%), рН (6,8–7,2) и температура раствора (15–25 °С) [56].

Использование специфичных реакций МО на действие токсикантов даёт мало сведений об интегральной токсичности объектов окружающей среды, обусловленной не только качественными и количественными характеристиками компонентов исследуемых систем, но и взаимным влиянием данных компонентов. Поэтому традиционный подход, заключающийся в определении интегральных показателей токсичности, благодаря необходимости оценки степени токсичности объектов исследования в целом, остаётся актуальным и востребованным. Так, измерение содержания растворённого кислорода вблизи чувствительного элемента, на который нанесены клетки МО, лежит в основе многочисленной группы методик определения БПК, являющегося показателем качества вод различного назначения. Для этих целей возможно использовать бактерии *Escherichia coli*, благодаря широкому кругу окисляемых органических веществ. Данный вид МО является перспективным в качестве основы рецепторного элемента биосенсоров для оценки токсичности бытовой продукции, позволяет получать данные с высокой корреляцией к стандартным методам гигиенической оценки. Для *E. coli* разработаны количественные критерии оценки токсичности товаров из полимерных и текстильных материалов с использованием микробного биосенсора на основе кислородного электрода [47].

Существуют биосенсоры на основе *B. subtilis* и *Paenibacillus* sp. для определения БПК в сточных водах целлюлозно-бумажной промышленности [57]. Исследована возможность определения БПК с помощью *Debaryomyces hansenii* ВКМ У-2482 [58–60]. Предложен биосенсор для определения загрязнённости воды органическими веществами на основе определения БПК, включающий электрод Кларка, сопряжённый с биорецептором, содержащем иммобилизованные на носителе клетки штамма дрожжей *Arxula adenivorans* ВКМ У-2676 или клетки штамма дрожжей *A. adenivorans* ВГИ 78(6) [61]. Среди аналитических систем с оптическими преобразователями сигнала, следует отметить биосенсор «Эколюм» (тест-система), который обладает очень широким спектром действия на разнообразные химические соединения: ТМ, пестициды, фенолы, углеводороды и т. д. Сущность метода основана на тушении свечения бактерий загрязнителями различной природы. Уменьшение интенсивности свечения обратно пропорционально токсическому эффекту. Критерием токсического действия является изменение величины интенсивности биOLUMИнесценции тест-объекта в исследуемой пробе по сравнению с контрольной пробой, не содержащей токсических веществ. Количественная оценка параметра тест-реакции выражается в виде безразмерной величины – индекса токсичности [62].

Одним из этапов совершенствования биосенсоров является их миниатюризация. Миниатюрные биосенсоры – биочипы (микроматрицы), с нанесёнными на них клетками микроорганизмов – перспективнейшая область развития биосенсоров [63].

Заключение

Для создания методик биотестирования исследуют, а затем используют такие биохимические показатели, как ферментативная активность, интенсивность биOLUMИнесценции, ПОЛ, состояние пигментного комплекса, выделение экзо- и эндометаболитов (азот-, серосодержащих соединений, органических кислот, полисахаридов и т. д.), способствующих детоксикации поллютантов.

Основными тенденциями при разработке методик биотестирования является усиление таких их характеристик, как автоматизация, экономичность и экспрессность тестирования, использование чувствительных, способных к специфичной или, наоборот, интегральной

ответной реакции микроорганизмов. Одно из направлений внедрения автоматизированных методик – создание таких биолого-аналитических устройств как биосенсоры и их миниатюрные аналоги – биочипы.

Использование в биосенсорах живых микроорганизмов позволяет снизить стоимость анализа по сравнению с использованием для этих целей компонентов клетки и оценить более реальное действие токсичных соединений на живые системы.

Аналитическое выявление эффекта при действии экотоксикантов на биохимические системы МО зависит от многих факторов, что может значительно затруднять интерпретацию результатов биотестирования. При разработке новых методик стараются использовать организмы, обладающие специфическим откликом на отдельные токсиканты или группы токсикантов. Большой прогресс в этом направлении достигнут при определении органических соединений: нафталина, фталатов и т. д. Имеются соответствующие разработки для определения ТМ.

Современной тенденцией при разработке методик биотестирования является использование специфичных реакций МО на действие токсикантов, однако определение интегральной токсичности (традиционный подход) объектов окружающей среды, благодаря необходимости оценки степени их токсичности в целом, остаётся актуальным и востребованным.

Выполнено в рамках государственного задания Вятского государственного университета по теме «Механизмы адаптации и устойчивости почвенной микробиоты к техногенному загрязнению» № 5. 4962.2017/БЧ.

Литература

1. Rai A.N. Nitrogenase derepression, its regulation and metabolic changes associated with diazotrophy in the non-heterocystous cyanobacterium *Plectonema boryanum* PCC 73110 // *Journal of General Microbiology*. 1992. V. 138. No. 3. P. 481–491.
2. Андреев Е.И., Иутинская Г.А., Валагурова Е.В., Козырницкая В.Е., Иванова Н.И., Остапенко А.Д. Иерархическая система биоиндикации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // *Почвоведение*. 1997. № 12. С. 1491–1496.
3. Валова Е.Е., Цыбенков Ю.Б., Цыбикова Е.В. Влияние тяжёлых металлов на ферментативную активность почвы // *Учёные записки ЗабГГПУ: Экология*. 2012. № 1. С. 63–66.

4. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю., Олькова А.С., Фокина А.И., Ашихмина Т.Я. Применение тетразольно-топографического метода определения дегидрогеназной активности цианобактерий в загрязнённых средах // *Теоретическая и прикладная экология*. 2008. № 2. С. 23–28.

5. Фокина А.И., Огородникова С.Ю., Домрачева Л.И., Лялина Е.И., Горностаева Е.А., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В. Цианобактерии как тест-организмы и биосорбенты // *Почвоведение*. 2017. № 1. С. 77–85.

6. Куц В.В., Аленина К.А., Сенько О.В., Ефременко Е.Н., Исмаилов А.Д. Билюминесцентный мониторинг экотоксикантов (Экологическая люминометрия) // *Вода: химия и экология*. 2011. № 10. С. 47–53.

7. Понаморёва О.Н. Бактериальные биосенсоры для экологического мониторинга углеводородов нефти: мини-обзор // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. 2010. № 2. С. 273–280.

8. Горностаева Е.А., Фокина А.И., Лаптев Д.С., Огородникова С.Ю., Жавороков В.И. Влияние ионов меди (II) на биохемилюминесценцию почвенных цианобактерий // *Адаптационные реакции живых систем на стрессорные воздействия: Материалы всероссийской молодёжной конференции*. Киров, 2012. С. 114–120.

9. Горностаева Е.А., Фокина А.И., Лаптев Д.С., Огородникова С.Ю., Жавороков В.И., Зворыгина В.М. Биохемилюминесценция почвенных цианобактерий рода *Phormidium* в условиях загрязнения среды медью (II) и никелем (II) // *Адаптационные реакции живых систем на стрессорные воздействия: Материалы всероссийской молодёжной конференции*. Киров, 2012. С. 120–123.

10. Жмур Н.С. Методика определения токсичности водных вытяжек из галитовых отходов и глинисто-солевых шламов, образующихся при производстве калийных удобрений, по снижению темпа роста (снижению численности клеток) и снижению уровня флуоресценции хлорофилла морских водорослей *Phaeodactylum tricorutum*. М.: АКВАРОС, 2016. 36 с.

11. Tombolini R., Unge A., Davey M.E., de Bruijn F.J., Jansson J.K. Flow cytometric and microscopic analysis of GFP-tagged *Pseudomonas fluorescens* bacteria // *FEMS Microbiol. Ecol.* 1997. V. 22. No. 1. P. 17–28.

12. Jha R.K., Kern T.L., Fox D.T., Strauss C.E.M. Engineering an acinetobacter regulon for biosensing and high-throughput enzyme screening in *E. coli* via flow cytometry // *Nucleic Acids Res.* 2014. V. 42. No. 12. P. 8150–8160.

13. Кудряшёва Н.С., Кратасюк В.А., Есимбекова Е.Н. Физико-химические основы билюминесцентного анализа. Красноярск, 2002. 154 с.

14. Владимиров Ю.А., Арчаков А.И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М.: Наука, 1972. 252 с.

15. Fokina A.I., Ogorodnikova S.Y., Kondakova L.V., Gornostaeva E.A., Zytkova Y.N., Domracheva L.I. Adaptation potential of naturally occurring cyanobacterial biofilms

- dominated by *Phormidium* spp. // Contemporary Problems of Ecology. 2015. T. 8. No. 6. P. 695–702.
16. Барабой В.А. Механизмы стресса и перекисное окисление липидов // Успехи современной биологии. 1991. Т. 111. № 6. С. 923–931.
17. Morelli E., Cioni P., Posarelli M., Gabellieri E. Chemical stability of CdSe quantum dots in seawater and their effects on a marine microalga // Aquat. Toxicol. 2012. P. 153–162.
18. Lushchak V.I. Budding yeast *Saccharomyces cerevisiae* as a model to study oxidative modification of proteins in eukaryotes // Acta Biochim. Polon. 2006. V. 53. No. 4. P. 679–684.
19. Dalle-Donne I., Aldini G., Carini M., Colombo R., Rossi R., Milzani A. Protein carbonylation, cellular dysfunction, and disease progression // J. Sell Mol. Med. 2006. V. 10. No. 2. P. 389–406.
20. Рублёва И.М., Ирбе И.К., Мерещанова А.Ю., Басова Е.Е. Фотосинтез как индикатор устойчивости альгокультуры к тяжёлым металлам // 1 Всерос. конф. фотобиологов. Пущино, 1996. С. 45–46.
21. Кадырова Г.Х., Расулов Б.А., Джаббарова О.И., Халилов И.М. Биовосстановление засоленных почв цианобактериями // Микроорганизмы и биосфера: Тезисы Международной научной конференции. М., 2007. С. 49–50.
22. Hasanova L.A., Ivanov A.YU., Polyakova L.R., YApparova E.H.I., Hasanova Z.M. Study of the stability of *Anacystis nidulans* Drouert cells (Cyanophyta) // Aġgologiya. 1999. T. 9. No. 2. P. 150 (in Russian).
23. Sozic M., Duony T.T., Boutry S., Coste M. Modulation de la toxicité des métaux vis-à-vis du développement des biofilms de cours d'eau (basin versant de Decazeville, France) // Coste Michel. Cryptogamie. Algol. 2008. V. 29. No. 3. P. 201–216.
24. Смирнова Г.В., Закирова О.Н., Октябрьский О.Н. Роль антиоксидантных систем в отклике бактерий *Escherichia coli* на тепловой шок // Микробиология. 2001. Т. 70. № 5. С. 595–601.
25. Октябрьский О.Н., Смирнова Г.В. Редокс-регуляция клеточных функций // Биохимия. 2007. Т. 72. Вып. 2. С. 158–174.
26. Октябрьский О.Н., Музыка Н.Г., Ушаков В.Ю., Смирнова Г.В. Роль тиоловых редокс-систем в отклике бактерий *Escherichia coli* на пероксидный стресс // Микробиология. 2007. Т. 76. № 6. С. 759–765.
27. Смирнова Г.В., Лепехина Е.В., Музыка Н.Г., Октябрьский О.Н. Роль тиоловых редокс-систем при ответе бактерий *Escherichia coli* на стрессовые воздействия температур и антибиотиков // Микробиология. 2016. Т. 85. № 1. С. 26–35.
28. Arwidsson Z., Allard V. Remediation of metal-contaminated soil by organic metabolites from fungi II – metal redistribution // Water Air and Soil Pollution. 2010. No. 207. P. 5–18.
29. Решетилов А.Н., Плеханова Ю.В., Тарасов С.Е., Арляпов В.А., Колесов В.В., Гуторов М.А., Готовцев П.М., Васильев Р.Г. Влияние некоторых углеродных наноматериалов на окисление этилового спирта бактериальными клетками *Gluconobacter oxydans* // Прикладная биохимия и микробиология. 2017. Т. 53. № 1. С. 115–122.
30. Решетилов А.Н. Электрохимические биосенсоры на основе микробных клеток, ферментов и антител: Дис. ... докт. хим. наук. М., 1998. 450 с.
31. Tecon R., Van der Meer J.R. Bacterial biosensors for measuring availability of environmental pollutants // Sensors. 2008. V. 8. No. 7. P. 4062–4080.
32. Van der Meer J.R., Belkin S. Where microbiology meets microengineering: design and applications of reporter bacteria // Nat. Rev. Microbiol. 2010. V. 8. No. 7. P. 511–522.
33. Понаморёва О.Н. Бактериальные биосенсоры для экологического мониторинга углеводородов нефти: мини-обзор // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2010. Вып. 2. С. 273–280.
34. Rogers K.R. Chip-based biosensors for environmental monitoring. Review // Part six, chab. 75 (p. 1–7) in handbook of biosensors and biochips. V. 2. Wiley-Interscience, 2007. 1500 p.
35. Riedel K., Kunze G., König A., Microbial sensors on a respiratori basis for wastewater monitoring // Adv. Biochem. eng. Biotechnol. 2002. No. 75. P. 81–118.
36. Mehta J., Sanjeev K. Bhardwaj, Bhardwaj N., Paul A.K., Kumar P., Kim Ki-H., Deep A. Progress in the biosensing techniques for trace-level heavy metals // Biotechnology Advances. V. 34. № 1. January–February 2016. P. 47–60.
37. Кудряшов А.П. Биосенсорные устройства: Курс лекций. Минск: БГУ, 2003. 110 с.
38. Ponomareva O.N., Arlyapov V.A., Alferov V.A., Reshetilov A.N. Microbial biosensors for detection of biological oxygen demand (Review) // Applied Biochemistry and Microbiology. January 2011. V. 47. P. 1–11.
39. Renella G., Giagnoni L. Light dazzles from the black box: whole – cell biosensors are ready to inform on fundamental soil biological processes // Chem. Biol. Technol. Agric. 2016. 3:8. P. 1–15.
40. Belkin S. Microbial whole-cell sensing systems of environmental pollutants // Curr. Opin. Microbiol. 2003. V. 6. No. 3. P. 206–212.
41. Van der Meer J.R., Tropel D., Jaspers M.C.M. Illuminating the detection chain of bacterial bioreporters // Environ. Microbiol. 2004. V. 6. No. 10. P. 1005–1020.
42. Wells M. Advances in optical detection strategies for reporter signal measurements // Curr. Opin. Biotechnol. 2006. V. 17. No. 1. P. 28–33.
43. Xu T., Close D., Smartt A., Ripp S., Sayler G. Detection of organic compounds with whole-cell bioluminescent bioassays // Adv. Bbiochem. Eng. Biotechnol. 2014. V. 144. P. 111–151.
44. Liu X., Germaine K., Ryan D., Dowling D.N. Whole-cell fluorescent biosensors for bioavailability and biodegradation of polychlorinated biphenyls // Sensors. 2010. V. 10. No. 2. P. 1377–1398.

45. Tecon R., Van der Meer J.R. Bacterial transcriptional regulators for degradation pathways of aromatic compounds // *Microbiol. Mol. Rev.* 2004. V. 68. No. 3. P. 474–500.
46. Котова В.Ю., Рыженкова К.В., Манухов И.В., Завильгельский Г.Б. Индуцируемые специфические Lux-биосенсоры для детекции антибиотиков: конструирование и основные характеристики // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2014. Т. 50. № 1. С. 112–117.
47. Чепкова И.Ф., Ануфриев М.А., Пономорёва О.Н., Алферов В.А., Решетилов А.Н., Щеглова В.А., Петрова С.Н. Применение биосенсора на основе иммобилизованных микроорганизмов для оценки токсичности продукции бытового назначения и товаров для детей // *Токсикологический вестник.* 2010. № 1. С. 34–40.
48. Решетилов А.Н. Бактерии *Pseudomonas* как основа рецепторного элемента микробных сенсоров для детекции ароматических ксенобиотиков // *Доклады РАН.* 1966. Т. 348. № 4. С. 552–555.
49. Кувичкина Т.Н., Будина Д.Б., Олькова А.С., Решетилов А.Н., Ашихмина Т.Я. Определение ди-(2-этилгексил)фталата в поливинилхлоридных пластификатах масс-спектрометрическим и биосенсорным методами // *Теоретическая и прикладная экология.* 2015. № 4. С. 11–15.
50. Кувичкина Т.Н., Ермакова И.Т., Решетилов А.Н. Штамм *Alcaligenes xylosoxydans* subsp. *denitrificans* TD2 как основа биосенсора для определения тиодигликоля // *Микробиология.* 2012. Т. 81. № 6. С. 810–811.
51. Никашина А.А., Пурыгин П.П., Решетилов А.Н., Ильясов П.В. Использование биосенсоров на основе микроорганизмов-деструкторов для детекции нефтепродуктов // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология.* 2010. Т. 53. № 1. С. 125–127.
52. Решетилов А.Н., Ильясов П.В., Кувичкина Т.Н., Емельянова Е.В., Боронин А.М., Кнакмусс Г.И. Биосенсорная система для определения 2,4-динитрофенола и ионов нитрита и биосенсоры для этой системы // Патент на изобретение RUS 2207377. 2000.
53. Решетилов А.Н., Решетилова Т.А. История развития биосенсорных исследований в институте биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г. К. Скрыбина РАН – Биосенсоры и биотопливные элементы на основе микробных клеток // *История науки и техники.* 2017. № 1. С. 65–69.
54. Ефременко Е.Н., Холстов А.В., Воронова Е.Н., Коныхов И.В., Погосян И.С., Рубин А.Б. Биосенсор на основе клеток микроводорослей для определения тяжёлых металлов и гербицидов в водных системах // Патент РФ 2 426 779 С1. 2001.
55. Цыбульский Е.И., Сазыкина М.А. Новые биосенсоры для мониторинга токсичности среды на основе морских люминесцентных бактерий // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2010. Т. 46. № 5. С. 1–6.
56. Юдина Н.Ю., Арляпов В.А., Зайцева А.С., Решетилов А.Н. Влияние времени культивирования, состава исследуемых проб и условий анализа на окислительную активность дрожжей *Debaryomyces hansenii* // *Известия Тульского государственного университета. Серия Естественные науки.* 2012. № 3. С. 186–197.
57. Raud M., Tutt M., Jogi E., Kikas T. BOD biosensors for pulp and paper industry wastewater analysis // *Environmental Science and Pollution Research.* August 2012. V. 19. № 7. P. 3039–3045.
58. Афонина Е.Л., Пономорёва О.Н., Каманина О.А., Строителев В.В. БПК-биосенсор на основе инкапсулированных в органосиликатную матрицу дрожжей *Debaryomyces hansenii* // *Актуальная биотехнология.* 2015. № 3(14). С. 66–67.
59. Рыбочкин П.В., Афонина Е.Л., Каманина О.А., Пономорёва О.Н. Перспектива использования дрожжей *Debaryomyces hansenii* ВКМ У-2482, инкапсулированных в золь-гель-матрицу силикагеля для определения БПК // *Экология родного края: проблемы и пути их решения: Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием.* Киров, 2016. С. 112–115.
60. Арляпов В.А., Мельников П.В., Юдина Н.Ю., Зайцев Н.К., Алферов В.А., Решетилов А.Н. Амперометрический биосенсорный анализатор для экспресс-определения биохимического потребления кислорода // *Биомедицинская радиоэлектроника.* 2016. № 10. С. 69–78.
61. Кувичкина Т.Н., Воронова Е.А., Ильясов П.В., Китова А.Е., Емельянова Е.В., Решетилов А.Н. Биосенсор для определения загрязнённости воды органическими веществами // Патент на полезную модель RUS 73975. 2007.
62. ПНДФТ 14.1:2:3:4.11-04. ПНДФТ 16.1:2:3:3.8-04. Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению интенсивности бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм». М., 2010.
63. Рогожин В.В., Рогожина Т.В. Биосенсоры и биочипы: сенсоры настоящего и будущего биотехнологий // *Современная наука: теория и практика.* 2015. № 1(8). С. 74–89.

References

- Rai A.N. Nitrogenase derepression, its regulation and metabolic changes associated with diazotrophy in the non-heterocystous cyanobacterium *Plectonema boryanum* PCC 73410 // *Journal of General Microbiology.* 1992. V. 138. No. 3. P. 481–491.
- Andreyuk E.I., Iutinskaya G.A., Valagurova E.V., Kozyrnickaya V.E., Ivanovna N.I., Ostapenko A.D. Hierarchical system of bioindication of soils polluted with heavy

metals // Pochvovedenie. 1997. No. 12. P. 1491–1496 (in Russian).

3. Valova E.E., Cybenov YU.B., Cybikova E.V. The influence of heavy metals on the enzymatic activity of soil // Uchenyy Zapiski ZabGGPU: Ekologiya. 2012. No. 1. P. 63–66 (in Russian).

4. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Ogorodnikova S.YU., Olkova A.S., Fokina A.I., Ashihmina T.Ya. Application of tetrazole-topographic method in determining the dehydrogenase activity of cyanobacteria in polluted environments // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2008. No. 2. P. 23–28 (in Russian).

5. Fokina A.I., Ogorodnikova S.YU., Domracheva L.I., Lyalina E.I., Gornostaeva E.A., Ashihmina T.YA., Kondakova L.V. Cyanobacteria as test organisms and biosorbents // Eurasian soil journal. 2017. No. 1. P. 70–77 (in Russian).

6. Kuc V.V., Alenina K.A., Senko O.V., Efremenko E.N., Ismailov A.D. Bioluminescent monitoring of ecotoxicants (Ecological luminometry) // Voda: himiya i ehkologiya. 2011. No. 10. P. 47–53 (in Russian).

7. Ponamoreva O.N. Bacterial biosensors for ecological monitoring of petroleum hydrocarbons: mini-review // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye nauki. 2010. No. 2. P. 273–280. (in Russian).

8. Gornostaeva E.A., Fokina A.I., Laptev D.S., Ogorodnikova S.Yu., Zhavorokov V.I. Influence of copper (II) ions on the biochemiluminescence of soil cyanobacteria // Adaptacionnye reakcii zhivyh sistem na stressornyye vozdeystviya: Materialy vserossiyskoj molodyozhnoj konferencii. Kirov, 2012. P. 114–120 (in Russian).

9. Gornostaeva E.A., Fokina A.I., Laptev D.S., Ogorodnikova S.YU., Zhavoronkov V.I., Zvorygina V.M. Biochemiluminescence of soil cyanobacteria of the genus *Phormidium* in conditions of contamination of the medium with copper (II) and nickel (II) // Adaptacionnye reakcii zhivyh sistem na stressornyye vozdeystviya: Materialy vserossiyskoj molodyozhnoj konferencii. Kirov, 2012. P. 120–123 (in Russian).

10. Zhmur N.S. Method for determination of toxicity of water extracts from halite waste and clay-salt slurries formed in the production of potassium fertilizers, to reduce the rate of growth (decrease in the number of cells) and to reduce the fluorescence level of chlorophyll *Phaeodactylum tricornutum* algae. Moskva: AKVAROS, 2016. 36 p. (in Russian).

11. Tombolini R., Unge A., Davey M.E., de Bruijn F.J., Jansson J.K. Flow cytometric and microscopic analysis of GFP-tagged *Pseudomonas fluorescens* bacteria // FEMS Microbiol. Ecol. 1997. V. 22. No. 1. P. 17–28.

12. Jha R.K., Kern T.L., Fox D.T., Strauss C.E.M. Engineering an acinetobacter regulon for biosensing and highthroughput enzyme screening in *E. coli* via flow cytometry // Nucleic Acids Res. 2014. V. 42. No. 12. P. 8150–8160.

13. Kudryashyova N.S., Kratasyuk V.A., Esimbekova E.N. Physicochemical basis of bioluminescent analysis, 2002. 154 p. (in Russian).

14. Vladimirov Yu.A., Archakov A.I. Peroxide oxidation of lipids in biological membranes. Moskva: Nauka, 1972. 252 p. (in Russian).

15. Fokina A.I., Ogorodnikova S.Y., Kondakova L.V., Gornostaeva E.A., Zykova Y.N., Domracheva L.I. Adaptation potential of naturally occurring cyanobacterial biofilms dominated by *Rhormidium* spp. // Contemporary Problems of Ecology. 2015. T. 8. No. 6. P. 695–702.

16. Baraboj V.A. Stress mechanisms and lipid peroxidation // Uspekhi Sovremennoj Biologii. 1991. T. 111. No. 6. P. 923–931 (in Russian).

17. Morelli E., Cioni P., Posarelli M., Gabellieri E. Chemical stability of CdSe quantum dots in seawater and their effects on a marine microalga // Aquat. Toxicol. 2012. P. 153–162.

18. Lushchak V.I. Budding yeast *Saccharomyces cerevisiae* as a model to study oxidative modification of proteins in eukaryotes // Acta biochim. Polon. 2006. V. 53. No. 4. P. 679–684.

19. Dalle-Donne I., Aldini G., Carini M., Colombo R., Rossi R., Milzani A. Protein carbonylation, cellular dysfunction, and disease progression // J. Sell Mol. Med. 2006. V. 10. No. 2. P. 389–406.

20. Rubleva I.M., Irbe I.K., Mereshchanova A.Yu., Basova E.E. Photosynthesis as an indicator of resistance of algoculture to heavy metals // I Vseros. konf. fotobiologov. Pushchino, 1996. P. 45–46 (in Russian).

21. Kadyrova G.H., Rasulov B.A., Dzhabbarova O.I., Halilov I.M. Bioresorption of saline soils by cyanobacteria // Mikroorganizmy i biosfera: tezisy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Moskva, 2007. P. 49–50 (in Russian).

22. Hasanova L.A., Ivanov A.YU., Polyakova L.R., Yapparova E.H.I., Hasanova Z.M. Study of the stability of *Anacystis nidulans* Drouert cells (Cyanophyta) // Algologiya. 1999. T. 9. No. 2. P. 150 (in Russian).

23. Soizic M., Duony T.T., Boutry S., Coste M. Modulation de la toxicite des metaux vis-a-vis du development des biofilms de cours d'eau (basin versant de Decazeville, France) // Coste Michel. Cryptogamie. Algol. 2008. V. 29. No. 3. P. 201–216.

24. Smirnova G.V., Zakirova O.N., Oktyabrskij O.N. Role of antioxidant systems in the response of *Escherichia coli* bacteria to heat shock // Mikrobiologiya. 2001. V. 70. P. 595–601 (in Russian).

25. Oktyabrskij O.N., Smirnova G.V. Redox-regulation of cellular functions // Biohimiya. 2007. T. 72. V. 2. P. 158–174 (in Russian).

26. Oktyabrskij O.N., Muzyka N.G., Ushakov V.Yu., Smirnova G.V. The role of thiol redox systems in the response of *Escherichia coli* bacteria to peroxide stress // Mikrobiologiya. 2007. V. 76. No. 6. P. 759–765 (in Russian).

27. Smirnova G.V., Lepekhina E.V., Muzyka N.G., Oktyabrskij O.N. The role of thiol redox systems in the response of *Escherichia coli* bacteria to stress effects of

- temperatures and antibiotics // *Mikrobiologiya*. 2016. T. 85. No. 1. P. 26–35 (in Russian).
28. Arwidsson Z., Allard V. Remediation of metal-contaminated soil by organic metabolites from fungi II – metal redistribution // *Water Air and Soil Pollution*. 2010. No. 207. P. 5–18.
29. Reshetilov A.N., Plekhanova Yu.V., Tarasov S.E., Arlyapov V.A., Kolesov V.V., Gutorov M.A., Gotovcev P.M., Vasilov R.G. Influence of some carbon nanomaterials on the oxidation of ethyl alcohol by bacterial cells of *Gluconobacter oxydans* // *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya*. 2017. V. 53. No. 1. P. 115–122 (in Russian).
30. Reshetilov A.N. Electrochemical biosensors based on microbial cells, enzymes, and antibodies. Dis. ... dokt. him. nauk. M., 1998. 450 p. (in Russian).
31. Tecon R., Van der Meer J.R. Bacterial biosensors for measuring availability of environmental pollutants // *Sensors*. 2008. V. 8. No. 7. P. 4062–4080.
32. Van der Meer J.R., Belkin S. Where microbiology meets microengineering: design and applications of reporter bacteria // *Nat. Rev. Microbiol.* 2010. V. 8. No. 7. P. 511–522.
33. Ponamoreva O.N. Bacterial biosensors for ecological monitoring of petroleum hydrocarbons: mini-review // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki*. 2010. V. 2. P. 273–280 (in Russian).
34. Rogers K.R. Chip-based biosensors for environmental monitoring. Review // Part six, chab. 75 (r. 1–7) in handbook of biosensors and biochips. V. 2. Wiley-Interscience, 2007. 1500 p.
35. Riedel K., Kunze G., Konig A., Microbial sensors on a respirator basis for wastewater monitoring // *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 2002. No. 75. P. 81–118.
36. Mehta J., Sanjeev K. Bhardwaj, Bhardwaj N., Paul A.K., Kumar P., Kim Ki-H., Deep A. Progress in the biosensing techniques for trace-level heavy metals // *Biotechnology Advances*. V. 34. No 1. January–February 2016. P. 47–60.
37. Kudryashov A.P. Biosensor devices: A course of lectures. Minsk: BGU, 2003. 110 p. (in Russian).
38. Ponamoreva O.N., Arlyapov V.A., Alferov V.A., Reshetilov A.N. Microbial biosensors for detection of biological oxygen demand (Review) // *Applied Biochemistry and Microbiology*. January 2011. V. 47. P. 1–11.
39. Renella G., Giagnoni L. Light dazzles from the black box: whole – cell biosensors are ready to inform on fundamental soil biological processes // *Chem. Biol. Technol. Agric.* 2016. 3:8. P. 1–15.
40. Belkin S. Microbial whole-cell sensing systems of environmental pollutants // *Curr. Opin. Microbiol.* 2003. V. 6. No. 3. P. 206–212.
41. Van der Meer J.R., Tropel D., Jaspers M.C.M. Illuminating the detection chain of bacterial bioreporters // *Environ. Microbiol.* 2004. V. 6. No. 10. P. 1005–1020.
42. Wells M. Advances in optical detection strategies for reporter signal measurements // *Curr. Opin. Biotechnol.* 2006. V. 17. No. 1. P. 28–33.
43. Xu T., Close D., Smartt A., Ripp S., Sayler G. Detection of organic compounds with whole-cell bioluminescent bioassays // *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 2014. V. 144. P. 111–151.
44. Liu X., Germaine K., Ryan D., Dowling D.N. Whole-cell fluorescent biosensors for bioavailability and biodegradation of polychlorinated biphenyls // *Sensors*. 2010. V. 10. No. 2. P. 1377–1398.
45. Tropel D., Van der Meer J.R. Bacterial transcriptional regulators for degradation pathways of aromatic compounds // *Microbiol. Mol. Rev.* 2004. V. 68. No. 3. P. 474–500.
46. Kotova V.Yu., Ryzhenkova K.V., Manuhov I.V. Indicated specific Lux-biosensors for detection of antibiotics: design and main characteristics // *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya*. 2014. V. 50. No. 1. P. 112–117 (in Russian).
47. Chepkova I.F., Anufriev M.A., Ponamoreva O.N., Alferov V.A., Reshetilov A.N., Shcheglova V.A., Petrova S.N. Application of a biosensor based on immobilized microorganisms to assess the toxicity of household products and products for children // *Toksikologicheskij vestnik*. 2010. No. 1. P. 34–40 (in Russian).
48. Reshetilov A.N. Bacteria *Pseudomonas* as the basis of the receptor element of microbial sensors for detection of aromatic xenobiotics // *Doklady RAN*. 1966. T. 348. No. 4. P. 552–555 (in Russian).
49. Kuvichkina T.N., Budina D.B., Olkova A.S., Reshetilov A.N., Ashihmina T.YA. Determination of di-(2-ethylhexyl) phthalate in polyvinyl chloride plasticizers by mass spectrometric and biosensor methods // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015. No. 4. P. 11–15 (in Russian).
50. Kuvichkina T.N., Ermakova I.T., Reshetilov A.N. The strain of *Alcaligenes xylosoxydans* subsp. *Denitrificans* TD2 as the basis of a biosensor for determination of thiodiglycol // *Mikrobiologiya*. 2012. V. 81. No. 6. P. 810–811 (in Russian).
51. Nikashina A.A., Purygin P.P., Reshetilov A.N., Ilyasov P.V. The use of biosensors based on microorganisms-destroyers for the detection of petroleum products // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2010. V. 53. No. 1. P. 125–127 (in Russian).
52. Reshetilov A.N., Ilyasov P.V., Kuvichkina T.N., Emelyanova E.V., Boronin A.M., Knakmuss G.I. Biosensor system for determination of 2,4-dinitrophenol and nitrite ions and biosensors for this system // *Patent na izobretenie RUS 2207377*. 2000. (in Russian).
53. Reshetilov A.N., Reshetilova T.A. The history of development of biosensory research in the Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms. GK Skryabin RAS – Biosensors and biofuel elements based on microbial cells // *Istoriya nauki i tekhniki*. 2017. No. 1. P. 65–69 (in Russian).
54. Efremenko E.N., Holstov A.V., Voronova E.N., Konyuhov I.V., Pogosyan I.S., Rubin A.B. Biosensor based

on microalgae cells for determination of heavy metals and herbicides in aqueous systems // Patent RF 2 426 779 S1. 2001. (in Russian).

55. Cybulskij E.I., Sazykina M.A. New biosensors for monitoring toxicity of the environment based on marine luminescent bacteria // *Prikladnaya Biohimiya i Mikrobiologiya*. 2010. T. 46. No. 5. P. 1–6 (in Russian).

56. Yudina N.Yu., Arlyapov V.A., Zaytseva A.S., Reshetilov A.N. Influence of the time of cultivation, the composition of the investigated samples and the conditions of analysis on the oxidative activity of the yeast *Debaryomyces hansenii* // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye nauki"*. 2012. No. 3. P. 186–197 (in Russian).

57. Raud M., Tutt M., Jogi E., Kikas T. BOD biosensors for pulp and paper industry wastewater analysis // *Environmental Science and Pollution Research*. August 2012. V. 19. No. 7. P. 3039–3045.

58. Afonina E.L., Ponamoreva O. N., Kamanina O.A., Stroitelev V.V. BOD-biosensor based on encapsulated organosilicate matrix of yeast *Debaryomyces hansenii* // *Aktualnaya Biotekhnologiya*. 2015. No. 3(14). P. 66–67 (in Russian).

59. Rybochkin P.V., Afonina E.L., Kamanina O.A., Ponamoreva O.N. Perspective of using yeast *Debaryomy-*

ces hansenii BKM Y-2482 encapsulated in sol-gel matrix of silica gel for determination of BOD // *Ekologiya rodnogo kraja: problemy i puti ih resheniya: Materialy XIV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Kirov, 2016. P. 112–115 (in Russian).

60. Arlyapov V.A., Melnikov P.V., Yudina N.Yu., Zaytsev N.K., Alferov V.A., Reshetilov A.N. Amperometric biosensor analyzer for rapid determination of biochemical oxygen consumption // *Biomedicinskaya Radioelektronika*. 2016. No. 10. P. 69–78 (in Russian).

61. Kuvichkina T.N., Voronova E.A., Piyasov P.V., Kitova A.E., Emelyanova E.V., Reshetilov A.N. Biosensor for determination of water pollution by organic substances // Patent for Utility Model RUS 73975. 2007. (in Russian).

62. PND FT 14.1:2:3:4.11-04. PND FT 16.1:2:3:3.8-04. Method for determining integrated toxicity of surface, including marine, groundwater, drinking, sewage water extracts of soil, waste, sewage sludge by changing the intensity of bacterial bioluminescence test system "Ecolum". Moskva, 2010. (in Russian).

63. Rogozhin V.V., Rogozhina T.V. Biosensors and biochips: sensors of the present and future biotechnologies // *Sovremennaya nauka: teoriya i praktika*. 2015. No. 1(8). P. 74–89 (in Russian).

УДК 528.88

Аэрокосмические методы в системе геоэкологического мониторинга природно-техногенных территорий

© 2017. Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, зав. лабораторией,

¹ Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,

² Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,
e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

Обсуждается применение аэрокосмических методов в геоэкологическом мониторинге природно-техногенных территорий. Разработана структурно-функциональная схема аэрокосмической компоненты комплексного экологического мониторинга, которая включает блоки: исходной информации (аэрофотоснимки и космические снимки), радиометрической и геометрической коррекции космоснимков, дешифрирования аэрофотоснимков и космических снимков, а также блок наземных наблюдений. Разработан модуль системы геоэкологического мониторинга природно-техногенного комплекса для территории в районе Кирово-Чепецкого промышленного комплекса, содержащий методы аэрокосмического мониторинга с использованием многозональных космических снимков в сочетании с наземными наблюдениями. Применение данного модуля позволит делать более достоверную оценку состояния как природных, так и природно-техногенных систем и объединит усилия различных служб, ведомств, предприятий в контроле состояния объектов окружающей среды и в осуществлении мер по снижению антропогенной нагрузки на природные среды и объекты.

Предложенные современные методы и технологии геоэкологической оценки, прогноза и мониторинга природно-техногенного комплекса с включением аэрокосмических методов в районе промышленного объекта могут быть рекомендованы для разработки программ и создания систем геоэкологического мониторинга других территорий, в том числе, особо охраняемых природных территорий.

Ключевые слова: аэрокосмический метод, геоэкологический мониторинг, природно-техногенные территории, космические снимки.