

УДК 581.1

<sup>1</sup>О.М. Цивилева\*, <sup>2</sup>А.Н. Панкратов, <sup>3</sup>И.Е. Кузнецова, <sup>3</sup>Б.Д. Зайцев,  
<sup>3</sup>А.М. Шихабудинов, <sup>4</sup>В.Ф. Королович

<sup>1</sup>Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, Лаборатория микробиологии

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Институт химии

<sup>3</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Лаборатория физической акустики, Россия, г. Саратов

<sup>4</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

Физический факультет, Украина, г. Киев

\*E-mail: [tsivileva@ibppm.sgu.ru](mailto:tsivileva@ibppm.sgu.ru)

### **Сорбционная чувствительность препаратов мицелия базидиомицета к парам аммиака по данным анализа распространения акустических волн**

В работе приведены данные об исследовании сорбционной чувствительности изолятов глубинной культуры высшего гриба шиитакэ, использованных в качестве модификатора акустического биосенсорного устройства. Выявлены условия подготовки биомодификатора, приводящие к повышенной чувствительности сенсора к водному раствору аммиака. На основе мицелиальных экстрактов получены чувствительные элементы пьезокварцевых резонаторов. Проведен отбор образцов грибных изолятов по критериям величины изменения резонансной частоты и характера релаксации. Выделена в чистом виде составляющая отклика резонатора, обусловленная пленкой из мицелиального экстракта, с помощью процедуры фиттингового моделирования. Получены значения массы пленок, вязкости и модуля упругости. Для установления факта присутствия газообразного аммиака рекомендовано использовать пленку экстракта мицелия шиитакэ в возрасте 14 суток, выращенного на синтетической среде культивирования с добавкой индол-3-уксусной кислоты (0.2 мг/л) и экстрагированного этанолом.

**Ключевые слова:** сорбционная чувствительность, акустические волны, грибные изоляты, мицелиальный экстракт.

O.M. Civileva, A.N. Pankratov, I.E. Kuznetsova, B.D. Zaitsev, A.M. Shihabudinov, V.F. Korolovich

#### **Sorption sensitivity of basidiomycete mycelium drugs to vapors of ammonia according to the analysis of acoustic wave propagation**

Data of sensitivity of sorption study deep culture isolates of higher shiitake mushroom used as a modifier acoustic biosensor device are presented in paper. The conditions for preparing biomodifier, leading to a higher sensitivity of the sensor to an aqueous solution of ammonia were determined. Sensitive elements of piezoelectric resonators were obtained on the basis of mycelial extracts. Sampling of fungal isolates on the criteria values change in resonant frequency and nature of relaxation was conducted. Pure component of resonator response caused by a film of mycelial extract was obtained using fitting simulation procedure. Values of weight of films, modulus of elasticity and viscosity were obtained. It is recommended to use a film shiitake mushroom mycelium extract, aged 14 days, cultivated on synthetic culture medium supplemented with indolyl-3-acetic acid (0.2 mg/L), and extracted with ethanol to determine whether the presence of gaseous ammonia.

**Key words:** sorption sensitivity, acoustic waves, mushroom isolate, mycelial extract.

О.М. Цивилева, А.Н. Панкратов, И.Е. Кузнецова, Б.Д. Зайцев, А.М. Шихабудинов, В.Ф. Королович

#### **Акустикалық толқындардың таралу талдауының нәтижелеріне сәйкес биодиомицет мицелия препаратының аммиак буларына сорбциялық сезімталдығы**

Жұмыста акустикалық биосенсор құрылғысының модификаторы ретінде қолданылған шиитакэ жоғары саңырауқұлағының тереңдік дақыл изоляттарының сорбциялық сезімталдығының зерттеулері келтірілген. Аммиактың сулы ерітіндісіне сенсордың жоғары сезімталдығына алып келетін биомодификаторды дайындау жағдайлары анықталды. Мицелиалды экстракттарлардың негізінде пьезокварцты резонаторлардың сезімтал

элементтері алынды. Резонансты жиіліктің және релаксация түрінің өлшем критерийлеріне байланысты саңырауқұлақ изоляттарының үлгілерінің іріктеуі жүргізілді. Фиттингті модельдеу процедурасының көмегімен мицелиалды экстракт қаптамасымен түсіндірілетін резонатор жауабының бөлігі таза күйінде бөлініп алынды. Қаптама массасы, тұтқырлық, серпімділік модулінің мәндері алынды. Газ тәрізді аммиактың барлығын анықтау үшін 14 тәулік болған, синтетикалық ортада индолил-3-сірке қышқылы (0,2 мг/л) қосылған және этанолмен экстракцияланған шиитаке мицелия экстрактысының қаптамасын қолдану ұсынылған.

**Түйін сөздер:** сорбциялық сезімталдық, акустикалық толқындар, саңырауқұлақ изоляттары, мицелиалды экстрактар.

## Введение

Задача обнаружения экологически опасных соединений в объектах окружающей среды остается на повестке дня. Применяемые в настоящее время инструментальные методы (масс-спектрометрия, хроматография, спектральный анализ) достаточно сложны и дорогостоящи.

Наиболее широко известными являются сенсоры газов резистивного типа, в том числе основанные на полупроводниковых газочувствительных материалах. К таким сенсорам можно также отнести сенсоры, в которых газочувствительные материалы модифицированы углеродными нанотрубками. Для газовой сенсорики важным является то, что углеродные нанотрубки имеют аномально высокую удельную поверхность, которая определяет особенности их сорбционных и электрохимических характеристик. Кроме того, они характеризуются размерами, позволяющими создавать наноразмерные неоднородности в матрице любого, в том числе сенсорного, материала [1]. Газочувствительные материалы на основе углеродных нанотрубок способны определять довольно широкий спектр газов-поллютантов [2].

В качестве нового эффективного подхода к обнаружению широкого круга соединений, в том числе токсичных газообразных, в образцах окружающей среды может быть использован метод биосенсорной детекции.

Разработка новых чувствительных модификаторов сенсоров для определения газообразных соединений – актуальная аналитическая задача. Особое внимание уделяется созданию биосенсоров для тест-анализа газовых сред различного генезиса. Такие сенсоры характеризуются высокой чувствительностью, быстротой опроса, доступностью, применимы для диагностики заболеваний и определения микроконцентраций соединений в воздухе. Биосенсоры состоят из неселективного трансдюсера (масс-чувствительные пьезопреобразователи, оптические, электрохимические, термокаталитические) и модификатора (бактерии, ферменты, белки, биологиче-

ски-активные вещества клетки) и применяются в аналитической практике, как в виде индивидуальных пленок, так и в смеси с различными добавками [3].

Важная роль в решении задач экологического мониторинга отводится микробным биосенсорам, которые перспективны как анализаторы в силу простоты и надежности конструкции, низкой стоимости биологического материала [4].

Акустические волны, генерируемые в пьезоэлектрической среде, составили технологически привлекательную основу для создания новой группы сенсоров, а именно «целого семейства» биосенсоров [5], характеризующихся чувствительностью, портативностью, относительной дешевизной. Функционирование таких систем может основываться как на поверхностных, так и на объемных акустических волнах. Использование сенсорных систем, функционирование которых связано одновременно с поверхностными акустическими волнами и с жидкими средами, крайне затруднено из-за явления рассеяния энергии волн в жидкости [6]. Большинство акустоволновых биосенсоров основано на объемных акустических волнах. Именно такая сенсорная система была впервые применена для изучения биологической системы [7]: вибрирующего пьезоэлектрического кристалла в биологическом растворе.

Акустоэлектронные датчики нового поколения могут стать весьма эффективным инструментом в исследованиях диагностически значимых взаимодействий, реализуемых в разнообразных биосенсорных системах.

В плане решения актуальной проблемы разработки газовых сенсоров перспективно применение пьезоэлектрических кварцевых резонаторов. Существующие датчики на основе пьезокварцевых резонаторов используют полупроводниковые чувствительные слои [8]. В то же время такие сенсоры неселективны, дают отклик на любые летучие вещества. Поэтому важен поиск чувствительных элементов пьезокварцевых сен-

соров, которые были бы селективны по отношению к индивидуальным веществам.

Многообещающим является использование в качестве чувствительных элементов, потенциально обладающих высокой селективностью, пленок, образующихся после испарения растворителя из экстрактов мицелия высших грибов. Независимо от того, обнаружат ли мицелиальные биомодификаторы – чувствительные элементы – выраженную селективность, несомненным их достоинством является простота приготовления и последующего удаления с поверхности пьезоэлектрического резонатора.

Цель настоящей работы – выявление отклика пьезокварцевого резонатора, модифицированного экстрактами мицелия высшего гриба *Lentinula edodes* (шиитаке), на аммиак.

В ходе исследований были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выращивание образцов на синтетических средах культивирования для приготовления экстрактов мицелия высшего гриба – базидиомицета *Lentinula edodes* (шиитаке), штамм F-249.

2. Получение экстрактов мицелия и на их основе – чувствительных элементов пьезокварцевых резонаторов.

3. Отбор образцов по критериям величины изменения резонансной частоты и характера релаксации.

4. Выделение в чистом виде составляющей отклика резонатора, обусловленной плёнкой из экстракта мицелия, с помощью процедуры фиттингового моделирования. Получение значений массы плёнок, вязкости и модуля упругости.

5. Объяснение характера влияния аммиака на пленку из мицелиального экстракта.

6. Выявление систем “добавка к мицелиальной культуре – концентрация добавки – экстрагент”, перспективных для создания сенсорных устройств с биомодификатором на основе мицелиальных экстрактов, чувствительных к аммиаку.

### Методы исследования

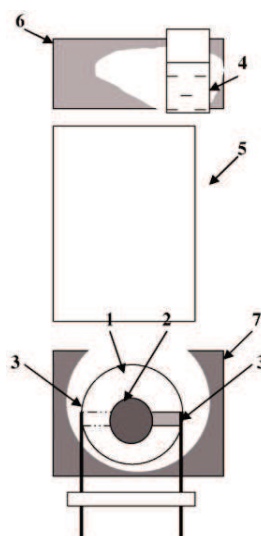
Основным методом исследования в настоящей работе явилось измерение акустических свойств тонких пленок с помощью пьезоэлектрических резонаторов.

Использовали аммиак водный  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  10 %-ный (масс.) квалификации “ч.д.а.” по ГОСТ 3760-79.

В основе метода исследования лежит свойство массчувствительности пьезокварцевых резонаторов. Известно, что при нанесении тонких пленок на поверхность резонатора уменьшается его резонансная частота и снижается амплитуда резонанса [9]. Это используется, например, для контроля толщины напыляемого материала при металлизации поверхностей или для исследования свойств материала, наносимого на поверхность резонатора. В нашей работе исследован другой, не рассмотренный ранее, аспект применения таких резонаторов [10].

Акустический импеданс – это комплексное сопротивление, которое вводится при рассмотрении колебаний акустических систем (излучателей, рупоров, труб и т. п.).

Ниже приведена схема экспериментальной установки (рисунок 1).



1 – кварцевый резонатор, 2 – пленка экстракта из мицелия, 3 – электроды, 4 – колба с 10% раствором аммиака, 5 – стеклянная трубка, 6 – крышка, 7 – камера с резонатором

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

На поверхность дискового кварцевого резонатора наносят жидкий экстракт из мицелия и высушивают в зависимости от смачивающих свойств раствора в течение времени от получаса до суток, после чего при помощи комбинированного измерителя импеданса регистрируют зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса от частоты резонатора. Затем резонатор помещают в герметичную стеклянную колбу, заполненную газообразным аммиаком благодаря присутствию водного раствора аммиака в другой, отделенной специальной перегородкой, части колбы.

Резонатор выдерживают в колбе 10 мин, затем повторяют измерения. После этого резонатор выдерживают в парах различных летучих соединений еще 20 мин и снова регистрируют названные зависимости. Резонатор извлекают из колбы, снимают вышеуказанные зависимости через 10 и 30 мин соответственно.

Регистрируют также данные для кварцевого резонатора как такового, без какой-либо подложки (параметры резонатора без пленки). Схематично можно представить последовательность измерений следующим образом:

- 1) резонатор без пленки;
- 2) резонатор с пленкой;
- 3) резонатор с пленкой в атмосфере исследуемого газа – 10 мин;
- 4) резонатор с пленкой в атмосфере газа еще 20 мин, суммарно 30 мин;
- 5) резонатор с пленкой на воздухе – 10 мин, суммарно 40 мин;
- 6) резонатор с пленкой на воздухе еще 20 мин, суммарно 60 мин;
- 7) резонатор без пленки;
- 8) резонатор с другой пленкой и т.д.

При каждом измерении регистрируют температуру.

Величины суммарного времени воздействия газовой атмосферы (исследуемого летучего вещества, а затем воздуха) на пленку мицелиального биомодификатора на поверхности резонатора в процессе каждого эксперимента в дальнейшем используют как значения абсцисс при построении графических зависимостей.

### Результаты и обсуждение

Метод пьезокварцевого микровзвешивания известен давно и широко применяется [11].

Он основан на том, что параметры пьезоэлектрического резонатора меняются от механи-

ческой нагрузки в виде тонких пленок или слоев на его поверхности. В настоящей работе мы также используем это свойство резонаторов, но не для развития указанного метода, а для того, чтобы исследовать перспективность приложения в этом методе новых нетрадиционных объектов. Таковыми являются, в частности, различно приготовленные пленки биомодификатора – изолятов грибного мицелия. Эти материалы были впервые предложены сотрудниками Лаборатории микробиологии Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов (ИБФРМ) РАН и кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского [10].

В химическом, пищевом и другом производстве, а также при диагностировании порывов аммиакопроводов важно располагать простыми, экономичными и надежными методами детектирования аммиака. Литературный поиск, в том числе просмотр патентов, касающихся детекторов аммиака, не позволил найти ни одного описания исследования, использующего акустические волны. Имеется перспектива разработать датчик на аммиак на основе пленки мицелиального биомодификатора и акустического элемента (в виде пьезорезонатора или звукопровода для волн Лэмба), что было бы весьма актуально. Главным нам представлялось то, чтобы этот датчик регистрировал изменение измеряемого параметра (резонансная частота или добротность кварцевого резонатора, или фаза и амплитуда волны Лэмба) в присутствии газа. В принципе можно было бы измерять и концентрацию газа, если удалось бы выявить зависимость изменения механических параметров пленки от концентрации. Таким образом, мы применяем известный метод для исследования свойств принципиально новых объектов.

Итак, как говорилось выше, эксперименты проводили с аммиаком в качестве потенциального детектируемого летучего компонента. Резонатор помещали в герметичную стеклянную колбу, заполненную парами аммиака  $\text{NH}_3$  благодаря присутствию в другой, отделенной специальной перегородкой, части колбы 10 масс. %-ного водного раствора аммиака. Резонатор выдерживали в колбе и на воздухе в соответствии с вышеописанной процедурой. Состав сред культивирования мицелия для дальнейшей обработки соответствовал таблице.

**Таблица** – Нумерация и обозначение образцов мицелия на основе монокультуры *Lentinus edodes* F-249, подвергнутых действию аммиака, и вариантов экстракции

Модификация	Вариант экстракции		
	1 мг на 1 мл воды	1 мг на 1 мл 96 %-ного этанола	1 мг на 1 мл смеси этанол – вода (1 : 1)
35 суток, сусло	1.1	1.2	1.3
Совместно с культурой <i>Azospirillum brasilense</i> Sp7	2.1	2.2	2.3
14 суток, синтетическая среда с 10 мг/л индолил-3-уксусной кислоты (ИУК)	3.1	3.2	3.3
14 суток, синтетическая среда с 5 мг/л ИУК	4.1	4.2	4.3
14 суток, синтетическая среда с 1 мг/л ИУК	5.1	5.2	5.3
14 суток, синтетическая среда с 0.5 мг/л ИУК	6.1	6.2	6.3
14 суток, синтетическая среда с 0.2 мг/л ИУК	7.1	7.2	7.3
14 суток, синтетическая среда без ИУК (контроль)	8.1	8.2	8.3
28 суток, синтетическая среда с 0.1 г/л (100 мг/л) ИУК	9.1	9.2	9.3
28 суток, синтетическая среда с 0,1 г/л триптофана	10.1	10.2	10.3
28 суток, синтетическая среда с 0,1 г/л ИУК и 0,1 г/л триптофана	11.1	11.2	11.3
28 суток, синтетическая среда без добавок (контроль)	12.1	12.2	12.3

Для всех 36 вариантов биомодификатора, указанных в таблице (12 образцов мицелия, помноженные на три способа экстрагирования), получили следующие величины:

абсолютное изменение резонансной частоты ( $\Delta\omega$ , Гц),

максимальное значение реальной части входного импеданса резонатора ( $R$ , Ом);

максимальное значение реальной части входного импеданса резонатора со слоем мицелия перед помещением в атмосферу аммиака ( $R_0$ , Ом).

Все указанные величины регистрировали для резонатора со слоем модификатора, находящегося в атмосфере аммиака в течение 10 мин и 30 мин, а также для резонатора со слоем модификатора, извлеченного из атмосферы аммиака после 10 мин и 30 мин.

Анализ полученных результатов показал, что образцы мицелия, выращенного на средах разного состава, а также экстрагированного разными растворителями, ведут себя неодинаково.

Нами установлено, что, как правило, присутствие паров аммиака приводит к уменьшению резонансной частоты и максимальной величины действительной части импеданса, а также к соответствующему изменению перепада реактивной части электрического импеданса кварцевого резонатора, покрытого мицелием. Кроме того, было экспериментально установлено, что после удаления паров аммиака по истечении некоторого времени (в нашем случае не менее 10 и не более 30 минут) резонансная частота и добротность резонатора меняются, приближаясь в той или иной степени к исходному положению.

Анализ результатов экспериментов пока-



зал, что все исследуемые образцы мицелия по влиянию на них паров аммиака в выбранном временном режиме измерений можно разделить на шесть характерных групп.

Полученные результаты не позволяют выявить закономерности в изменении характеристик импеданса для пленок на основе образцов мицелия в зависимости от возраста культуры, наличия добавки ИУК или триптофана, факта совместного культивирования с *Azospirillum brasilense*, природы экстрагента.

В то же время анализ обширного массива данных дает возможность отобрать три образца, отклик которых на высокочастотное воздействие является оптимальным по сравнению с другими, и продолжить целенаправленные исследования пленок на основе этих образцов.

Это образцы 3.2, 7.3, 8.2, входящие в одну группу. Они являются наилучшими с той точки зрения, что после воздействия паров аммиака на резонатор, покрытый пленкой мицелия из образцов этой группы, характеристики резонатора (резонансная частота, реальная и мнимая части импеданса) восстанавливаются.

Все эти образцы 3.2, 7.3, 8.2 имеют возраст культивирования мицелия 14 суток. Образец 3.2 содержит 10 мг/л ИУК, экстракция проводится 96 %-ным этанолом. Содержание ИУК в образце 7.3 составляет 0.2 мг/л, экстрагент – водно-этанольная смесь 1 : 1. Образец 8.2 не содержит ИУК (контроль), экстракция осуществляется этанолом.

По мере развития культуры в мицелии накапливаются жирные и другие органические кислоты, а добавки к среде выращивания сорбируются и/или вступают во взаимодействие с химическими компонентами мицелия. В то же время чем больше возраст культуры, тем в большей степени интенсифицируется автолиз мицелия (самопроизвольное разрушение его клеток). Поэтому слишком продолжительное выращивание мицелия сказалось отрицательно на свойствах экстракта из него, и в нашем эксперименте все удачные образцы имеют возраст 14 суток, а не 28 или 35 суток.

Вероятно, связыванию аммиака способствуют кислотные свойства ИУК, а также наличие органических кислот. Гриб синтезирует в том числе триптофан в заметных количествах [12]. Этанол по сравнению с водой более полно извлекает ИУК, триптофан и жирные кислоты

как вещества с достаточно уравновешенным гидрофильно-липофильным балансом. Для иллюстрации последнего нами по атомно-связево-аддитивной схеме [13-16] рассчитаны величины  $\lg P$  ( $P$  – коэффициент распределения в системе 1-октанол – вода, служащий общепринятой мерой гидрофобности или липофильности). В случае ИУК он составляет 0.58, а для триптофана – 0.19. Для сравнения отметим, что в случае явно гидрофобных *n*-гексана и 1-октанола величины  $\lg P$  составляют 2.88 и 2.53 соответственно, для этанола  $\lg P = 0.08$ , для гидрофильного метанола  $\lg P = -0.27$ , а для воды  $\lg P = -0.51$  [17, 18].

В то же время обратимость связывания аммиака мицелием свидетельствует о том, что протолитическое взаимодействие между молекулами  $\text{NH}_3$  и карбоновыми кислотами не приводит к полному переносу протона к молекуле аммиака, а происходит, вероятно, лишь образование межмолекулярной водородной связи.

Во всех проведенных нами экспериментах с аммиаком измеренные значения частот и их смещений, ширина полос и др. содержат вклады как от объекта исследования (экстракта мицелия), так и от резонатора. Последняя составляющая изменяется от опыта к опыту, то есть не является постоянной. Поэтому ее необходимо исключать. Исключение компоненты, отвечающей резонатору, произведено нами с помощью процедуры фиттингового моделирования [19-22].

Помимо выделения в чистом виде сигнала исследуемого материала, указанная процедура позволяет получить значения плотности, толщины пленки, вязкости, а также наиболее важного диагонального элемента тензора модуля упругости (соответствующего деформации материала в направлении главной оси тензора).

Таким образом, фиттинг дает возможность получать многомерную информацию об исследуемом материале, то есть открывает перспективы создания сенсора, регистрирующего одновременно целую серию независимых физико-химических параметров образца.

Таковыми параметрами в наших экспериментах были сдвиговый модуль упругости, динамическая вязкость и масса пленки, нанесенной на резонатор. Массу рассчитывали с использованием значений плотности, толщины, а также площади поверхности области металлизации дискового кварцевого резонатора, на которую наносился экстракт мицелия.

В результате процедуры фиттингового моделирования наши первоначальные представления и выводы относительно свойств биомодификатора, перспективного в качестве компонента сенсорного устройства, подверглись некоторой корректировке. Тем не менее прежние качественные оценки оказались в целом правильными. Так, по изменению резонансной частоты, реальной и мнимой частей импеданса под действием  $\text{NH}_3$  образец 7.3 выбран нами как оптимальный. После фиттинга выяснилось, что “лидирующие позиции” набора образцов 7.1-7.3 (0.2 мг/л ИУК) сохраняются, однако лучшими свойствами все же обладает не образец 7.3 (экстрагент – водно-этанольная смесь), а образец 7.2 (экстрагент – 96 %-ный этанол). Относительное изменение массы пленки биомодификатора чувствительно к действию аммиака, резко возрастает при контакте с  $\text{NH}_3$  (особенно в случае 7.2) уже через 10 мин. В процессе эксперимента действие летучего вещества снимается, и на воздухе происходит возврат к начальному значению массы пленки, причем полный возврат имеет место лишь в случае 7.2 – соблюдается одно из важнейших требований к масс-чувствительному преобразователю сенсорного устройства. Образец 7.1 (также 0.2 мг/л ИУК, но экстрагент – вода) пригоден в гораздо меньшей степени.

Ввиду вышесказанного по поводу важности получения многомерной информации о сенсорном слое при детектировании целевого летучего вещества заслуживает внимания тот факт, что именно у образца 7.2 наиболее ярко проявляется зависимость от действия  $\text{NH}_3$  не только массы пленки, но и модуля упругости. Этот последний параметр уменьшается от начального значения  $0.197 \cdot 10^{-8}$  до  $0.106 \cdot 10^{-8}$  Па уже через 10 мин контакта с аммиаком, не меняется ( $0.103 \cdot 10^{-8}$  Па) к окончанию получасового действия  $\text{NH}_3$ , а за-

тем через 10 мин в воздушной атмосфере возвращается к величине  $0.211 \cdot 10^{-8}$  Па, практически сохраняясь постоянным и равным исходному ( $0.204 \cdot 10^{-8}$  Па) при дальнейшем пребывании (до 60 мин) на воздухе.

По результатам подбора сенсорного покрытия на основе мицелиального экстракта, чувствительного к аммиаку, делаем следующий вывод: мицелий шиитаке следует выращивать при добавлении в жидкую питательную среду 0.2 мг/л ИУК в течение 14 сут, полученный таким способом мицелий экстрагировать этанолом.

Таким образом, в результате проведенной работы нами была исследована сорбционная чувствительность экстрактов мицелия высшего гриба шиитаке к 10 %-ному водному раствору аммиака.

Присутствие паров аммиака приводит к уменьшению резонансной частоты и максимальной величины действительной части импеданса, а также к соответствующему изменению перепада реактивной части электрического импеданса кварцевого резонатора, покрытого мицелием.

С помощью процедуры фиттингового моделирования в чистом виде выделена составляющая отклика резонатора, обусловленная пленкой из экстракта мицелия. Получены значения массы пленок, вязкости и модуля упругости.

Для установления факта присутствия газообразного аммиака рекомендовано использовать пленку экстракта мицелия шиитаке в возрасте 14 суток, выращенного на синтетической среде культивирования с добавкой индолил-3-уксусной кислоты (0.2 мг/л) и экстрагированного этанолом.

Пленки на основе экстрактов из мицелия можно использовать для создания на их основе чувствительных элементов акустических химических сенсоров.

## Литература

- 1 Рембеза С.И., Шматова Ю.В., Свистова Т.В., Рембеза Е.С., Кошелева Н.Н. Электрические и газосенсорные свойства нанокompозита на основе SnO<sub>2</sub> с многостенными углеродными нанотрубками // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, № 9. – С. 1213-1216.
- 2 Надда М.З., Петров В.В., Шихабудинов А.М. Исследование свойств нанокompозитного материала для высокочувствительных сенсоров диоксида азота // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4, часть 2. – <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1349>.
- 3 Силина Ю.Е. Определение летучих компонентов строительных материалов в воздухе помещений с применением масс-метрических преобразователей: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Саратов: Саратовск. гос. ун-т, 2005. – 24 с.
- 4 Макаренко А.А. Биосенсоры для детекции сульфоароматических и фенольных соединений на основе бактерий родов *Comamonas* и *Pseudomonas* - деструкторов *n*-толуолсульфоната и фенола: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Саратов: ИБФРМ РАН, 2007. – 26 с.
- 5 Andle J.C., Vetelino J.F. Acoustic Wave Biosensors // Sensors and Actuators A: Physical. – 1994. – V. 44. – P. 167-176.
- 6 Calabrese G.S., Wohtjen H., Roy M.K. Surface Acoustic Wave Devices As Chemical Sensors in Liquids: Evidence Disputing the Importance of Rayleigh Wave Propagation // Anal. Chem. – 1987. – V. 59. – P. 833-837.
- 7 King W.H. The Use of Resonating Devices to Make Small Mass Measurements // Bull. N.Y. Acad. Med. – 1972. – V. 48. – P. 459-467.
- 8 Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Бородин И.А. Влияние граничных условий для электрического поля на характеристики поверхностных акустических волн, распространяющихся в ниобате калия // Акустич. журн. – 2004. – Т. 50, № 4. – С. 462-468.
- 9 Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 628 с.
- 10 Пат. 2346051 Российская Федерация. МПК C 12 Q 1/00 (2006/01) G 01 N 27/00 (2006/01). Биомодификатор для определения фенола и его производных / О.М. Цивилева, В.Е. Никитина, Т.А. Кучменко, Ю.Е. Силина, А.Н. Панкратов. Заявл. 26.02.2007, № 2007106772/13; Оpubл. 10.02.2009. 7 с. // Изобретения. Полезные модели. 2009. Бюл. № 4 (Ч. III). – С. 837.
- 11 Ho M. Applications of Piezoelectric Quartz Crystal Microbalances / Editors: C. Lu, A.W. Czanderna. – Amsterdam: Elsevier/ North Holland, 1984.
- 12 O.M. Tsivileva, E.A. Loshchinina, O.E. Makarov, V.E. Nikitina, Auxin Synthesis by the Higher Fungus *Lentinus edodes* (Berk.) Sing in the Presence of Low Concentrations of Indole Compounds, *Applied Biochemistry and Microbiology* 48 (2012). – P. 280-289.
- 13 Ghose A.K., Crippen G.M. Atomic Physicochemical Parameters for Three-Dimensional-Structure-Directed Quantitative Structure - Activity Relationships. 2. Modeling Disperse and Hydrophobic Interactions // J. Chem. Inf. and Comput. Sci. 1987. Vol. 27, № 1. – P. 21-35.
- 14 Viswanadhan V.N., Ghose A.K., Revankar G.N., Robins R.K. Atomic Physicochemical Parameters for Three Dimensional Structure Directed Quantitative Structure - Activity Relationships. 4. Additional Parameters for Hydrophobic and Dispersive Interactions and Their Application for an Automated Superposition of Certain Naturally Occurring Nucleoside Antibiotics // J. Chem. Inf. and Comput. Sci. 1989. Vol. 29, № 3. – P. 163-172.
- 15 Ghose A.K., Crippen G.M. Atomic Physicochemical Parameters for Three-Dimensional Structure-Directed Quantitative Structure - Activity Relationships. I. Partition Coefficients As a Measure of Hydrophobicity // J. Comput. Chem. 1986. Vol. 7, № 4. – P. 565-577.
- 16 Ghose A.K., Pritchett A., Crippen G.M. Atomic Physicochemical Parameters for Three Dimensional Structure Directed Quantitative Structure - Activity Relationships III: Modeling Hydrophobic Interactions // J. Comput. Chem. 1988. Vol. 9, № 1. – P. 80-90.
- 17 Pankratov A.N. Azo-Coupling Reactions Used in Analytical Chemistry: The Role of Reactants, Intermediates, and Aqueous Medium // Helvetica Chim. Acta. 2004. Vol. 87, № 6. – P. 1561-1573.
- 18 Панкратов А.Н. Аналитические реакции азосочетания: взгляд с точки зрения квантовой химии // Журн. аналит. химии. 2005. Т. 60, № 10. – С. 1036-1046.
- 19 Кузнецова И.Е., Ульзутуев А.Н., Зайцев Б.Д., Ушаков Н.М., Кособудский И.Д. Акустические характеристики полимерных нанокompозитных пленок // Труды XVIII сессии РАН. 11-15 сентября, 2006, Таганрог. – Т. 1. – С. 15-19.
- 20 Zaitsev B.D., Joshi S.G., Dhuru V.B. Elastic Properties of Dentin Bonding Agents Using Bulk Acoustic Waves // Proceedings of IEEE Ultrasonic Symposium. – 1997. – Vol. 1. – P. 623-626.
- 21 Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. – М.: Наука, 1982. – 424 с.
- 22 Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах. – М.: Мир, 1990. – 583 с.

## References

- 1 Rembeza S.I., Shmatova Y.V., Svistova T.V., Rembeza E.S., Koshelev N.N. Electrical properties and gas sensor nanocomposite SnO<sub>2</sub> with multi-walled carbon nanotubes [*Jelektricheskie i gazosensornye svojstva nanokompозита na osnove SnO2 s mnogostennymi uglernodnymi nanotrubkami*]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov – Semiconductors*, 2012. 46(9). P. 1213-1216.
- 2 Nadda M.Z., Petrov V.V., Shihabudinov A.M. Investigation of the properties of the nanocomposite material for highly sensitive sensors of nitrogen dioxide [*Issledovanie svojstv nanokompозитnogo materiala dlja vysokochuvstvitel'nyh sensorov dioksida azota*]. *Inzhenernyj vestnik Dona – Engineering Gazette Don*, 2012. 4, 2. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1349>.
- 3 Silina Y.E. Determination of volatile components of building materials in indoor air using a mass-metric converters [*Opreделение*



*letuchih komponentov stroitel'nyh materialov v vozduhe pomeshhenij s primeneniem mass-metricheskikh preobrazovatelej*]: Author's abstract Saratov: Saratov. Reg. University, 2005. P. 24.

4 Makarenko A.A. Biosensors for the detection of aromatic sulfonic acid and phenolic compounds on the basis of bacterial genera *Comamonas* and *Pseudomonas* - destructors *p*-toluene and phenol [*Biosensory dlja detekcii sul'foaromaticeskikh i fenol'nyh soedinenij na osnove bakterij rodov Comamonas i Pseudomonas - destruktorov p-toluolsul'fonata i fenola*]: Author's abstract. Saratov IBPPM RAS, 2007. P. 26.

5 Andle J.C., Vetelino J.F. Acoustic Wave Biosensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994. 44, P. 167-176.

6 Calabrese G.S., Wohltjen H., Roy M.K. Surface Acoustic Wave Devices As Chemical Sensors in Liquids: Evidence Disputing the Importance of Rayleigh Wave Propagation. *Anal. Chem.*, 1987, 59. P. 833-837.

7 King W.H. The Use of Resonating Devices to Make Small Mass Measurements. *Bull. N.Y. Acad. Med.*, 1972. 48. P. 459-467.

8 Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Borodin I.A. Influence of boundary conditions for the electric field on the characteristics of surface acoustic waves propagating in potassium niobate [*Vlijanie granichnykh uslovij dlja jelektricheskogo polja na harakteristiki poverhnostnykh akusticheskikh voln, rasprostranjajushhihsja v niobate kalija*]. *Akustich. Zhurn – Acoustic. journal*, - 2004, 50(4). P. 462-468.

9 Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. Piezoelectric sensors [*P'ezojelektricheskie datchiki*]. Moscow: Technosphere, 2006. P. 628.

10 Pat. 2346051 Russian Federation. IPC C 12 Q 1/00 (2006/01) G 01 N 27/00 (2006/01). Biomodifier for determining phenol and its derivatives [*Biomodifikator dlja opredelenija fenola i ego proizvodnyh*]. OM Tsivileva, VE Nikitina, TA Kuchmenko, JE Silina, AN Pankratov. Appl. 26.02.2007, № 2007106772/13, publ. 10.02.2009. 7 p. Inventions. Utility models. 2009. Bull. Number 4 (Part III). - P. 837.

11 Ho M. Applications of Piezoelectric Quartz Crystal Microbalances. Editors: C. Lu, A.W. Czanderna. Amsterdam: Elsevier/ North Holland, 1984.

12 Tsivileva O.M., Loshchinina E.A., Makarov O.E., Nikitina V.E. Auxin Synthesis by the Higher Fungus *Lentinus edodes* (Berk.) Sing in the Presence of Low Concentrations of Indole Compounds. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2012, 48. P. 280-289.

13 Ghose A.K., Crippen G.M. Atomic Physicochemical Parameters for Three-Dimensional-Structure-Directed Quantitative Structure - Activity Relationships. 2. Modeling Disperse and Hydrophobic Interactions. *J. Chem. Inf. and Comput. Sci.*, 1987. 27(1). P. 21-35.

14 Viswanadhan V.N., Ghose A.K., Revankar G.N., Robins R.K. Atomic Physicochemical Parameters for Three Dimensional Structure Directed Quantitative Structure - Activity Relationships. 4. Additional Parameters for Hydrophobic and Dispersive Interactions and Their Application for an Automated Superposition of Certain Naturally Occurring Nucleoside Antibiotics. *J. Chem. Inf. and Comput. Sci.*, 1989. 29(3). P. 163-172.

15 Ghose A.K., Crippen G.M. Atomic Physicochemical Parameters for Three-Dimensional Structure-Directed Quantitative Structure - Activity Relationships. I. Partition Coefficients As a Measure of Hydrophobicity. *J. Comput. Chem.*, 1986, 7(4). P. 565-577.

16 Ghose A.K., Pritchett A., Crippen G.M. Atomic Physicochemical Parameters for Three Dimensional Structure Directed Quantitative Structure - Activity Relationships III: Modeling Hydrophobic Interactions. *J. Comput. Chem.*, 1988, 9(1). P. 80-90.

17 Pankratov A.N. Azo-Coupling Reactions Used in Analytical Chemistry: The Role of Reactants, Intermediates, and Aqueous Medium. *Helvetica Chim. Acta*, 2004, 87(6). P. 1561-1573.

18 Pankratov A.N. Analytical coupling reaction: a perspective from quantum chemistry [*Analiticheskie reakcii azosochetaniya: vzgljad s točki zrenija kvantovoj himii*]. *Zhurn. analyt. Himii – Journ. Anal. Chemistry*. 2005. 60 (10). P. 1036-1046.

19 Kuznetsova I.E., Ulzutuev A.N., Zaitsev B.D., Ushakov N.M., Kosobudsky I.D. Acoustic characteristics of polymeric nanocomposite films [*Akusticheskie harakteristiki polimernykh nanokompozitnykh plenok*]. Proceedings of the XVIII Session of the Russian Academy of Sciences. September 11-15, 2006, Taganrog. I. P. 15-19.

20 Zaitsev B.D., Joshi S.G., Dhuru V.B. Elastic Properties of Dentin Bonding Agents Using Bulk Acoustic Waves [*Uprugie volny v tverdyh telah*]. Proceedings of IEEE Ultrasonic Symposium. 1997. I P. 623-626.

21 Delesan E., Royer D. Elastic waves in solids. Moscow: Nauka, 1982. P. 424.

22 Zelenka I. Piezoelectric resonators on bulk and surface acoustic waves [*P'ezojelektricheskie rezonatory na ob'emnykh i poverhnostnykh akusticheskikh volnah*]. Moscow: Mir, 1990. P. 583.