

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 681.511+577.31+53.082.9+517.929

© А. Л. Буляница

ХЕМОСЕНСОР НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ КОЛОНИИ НЕСОВЕРШЕННЫХ ГРИБОВ ("ЭЛЕКТРОННЫЙ РОТ")

Предложена концепция хемосенсорного анализатора, в основе которого лежит чувствительный элемент естественного происхождения — колония несовершенных мицелиальных грибов (КНМГ). Грибная клетка может интерпретироваться как совокупность слабоселективных сенсоров, откликающихся на состав, температуру, освещенность окружающей среды. Тем самым просматривается их сходство с мультисенсорами типа "электронный нос" и "электронный язык". Вместе с тем самоорганизация КНМГ связана с потреблением питательного субстрата и выработкой метаболитов в окружающую среду. Последняя особенность позволяет предложить для такого хемосенсора название "электронный рот".

ВВЕДЕНИЕ

Как правило, обеспечить только одно воздействие на живой или неживой объект не представляется возможным. При этом под воздействием подразумевается любое действие (механическое, звуковое, химическое, биологическое и т. д.) со стороны окружающей среды. Последняя может быть различна: а) естественная природная среда (улица, лес, побережье моря и т. д.); б) живой организм человека или животного; в) технологические (производственные) помещения и т. д.

В частности, поскольку воздух представляет собой достаточно сложную газовую смесь (O_2 , N_2 , CO_2 , NO_2 , NO , SO_2 , SO_3 , NH_3 и многих других), то допущение, что на какой-либо объект будет действовать только NO без влияния NO_2 представляется малообоснованным и спорным.

Таким образом, следует предполагать, что практически на любой объект, находящийся в условиях, близких к естественным, оказываются многочисленные воздействия. Ограничиваясь только химическими воздействиями, полагаем, что объект взаимодействует с несколькими химическими веществами.

Анализ окружающей среды требует количественного оценивания концентраций основных химических компонентов или иных (например, физических) характеристик. В то же время при контроле количественная оценка характеристик не обязательна, т. к. требуется лишь сигнализация о достижении некоторых пороговых значений.

Поскольку суммарное воздействие на объект неочевидным способом связано с индивидуальными воздействиями каждого химического компонента, то для решения задач анализа и контроля окружающей среды необходимо ввести некоторую комплексную (интегральную) оценку.

Практически комплексная оценка представляет собой "образ среды". Объединяя "образы", соответствующие необходимому химическому составу, требуемому уровню освещенности, температуры, вибраций и т. д., можно сформировать "образ благоприятной среды", "образ среды, опасной для жизни (работы, технологического процесса и т. п.)". Таким образом, нужен сенсор, который бы воспринимал комплексное воздействие среды и преобразовывал бы его в такой "образ".

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В конце XX века были разработаны новые типы аналитических устройств, основанные на искусственных химических сенсорах, а именно, "электронный нос" и "электронный язык". Они являются инструментами анализа и контроля газовых и жидких сред, состоящими из систем слабоселективных сенсоров с частичной специфичностью к различным компонентам и использующими для обработки сигналов различные математические методы распознавания образов (нейронные сети, некорректная логика и другие) [1]. То есть указанные системы выполняют следующую последовательность функциональных операций: а) химический состав внешней среды преобразуют в отклик мультисенсора, б) методами математической обработки формируют численный "образ" среды. Как правило, связать отклик такого сенсора с концентрацией каждой из компонент анализируемой среды бывает либо невозможно, либо крайне сложно даже в случаях, допускающих линеаризацию отклика.

В частности, при малых концентрациях компонент можно аппроксимировать отклик каждого из n сенсоров как функцию m переменных (концен-

траций анализируемых компонент) рядом Тейлора первого порядка. Тогда обратная задача требует решения квадратной или прямоугольной системы линейных уравнений. При этом, как правило, такая система будет иметь высокую степень обусловленности, и даже очень малая вариация отклика любого из сенсоров приведет к очень большим вариациям оценок концентраций. В общем случае предполагать как линейность отклика на каждую компоненту среды, так и их аддитивность (либо мультипликативность) нет достаточных оснований. Вследствие практической невозможности (либо низкой достоверности) решения обратной задачи отклик мультисенсоров типа "электронный нос" и "электронный язык" на суммарное воздействие анализируемой среды представляется точкой (с учетом допустимого разброса каждой из координат — областью) в m -мерном пространстве, а расположение этой области сопоставляется с границами (или эталонами).

Материалы, из которых производятся мультисенсоры, могут быть различны: например, полупроводниковый субстрат Si/SiO₂/Si₃N₄ на основе халькогенидных стекол или полимерных пленок [2]. Основные применения "электронного носа" и "электронного языка" — это идентификация (оценка качества и вкуса) и выявление возможных фальсификаций пищевых продуктов [1], а также сельскохозяйственные приложения [3]. Заметим, что общим является искусственное происхождение сенсоров и относительная неинвазивность (отсутствие влияния сенсора на анализируемую среду).

МУЛЬТИХЕМОСЕНСОР НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ КОЛОНИИ НЕСОВЕРШЕННЫХ МИЦЕЛИАЛЬНЫХ ГРИБОВ

Естественным чувствительным элементом, реагирующим на условия окружающей среды (в том числе на ее химический состав), являются микроскопические несовершенные мицелиальные грибы. При этом, оценить роль каждого из отдельных факторов (питательные и нейтральные компоненты среды, уровень освещенности, температура и т.д.) весьма сложно. Подобные задачи решались, главным образом, на качественном уровне. Однако такой чувствительный элемент позволяет выполнить преобразование "среда $\Rightarrow$ колония". То есть структуру и состав КНМГ можно считать откликом на окружающую среду.

Структура колонии может быть исследована различными методами. Наиболее естественными представляются фотометрический или близкие к нему методы, позволяющие получить пространственное или, по крайней мере, двумерное распределение оптической плотности. Далее для формиро-

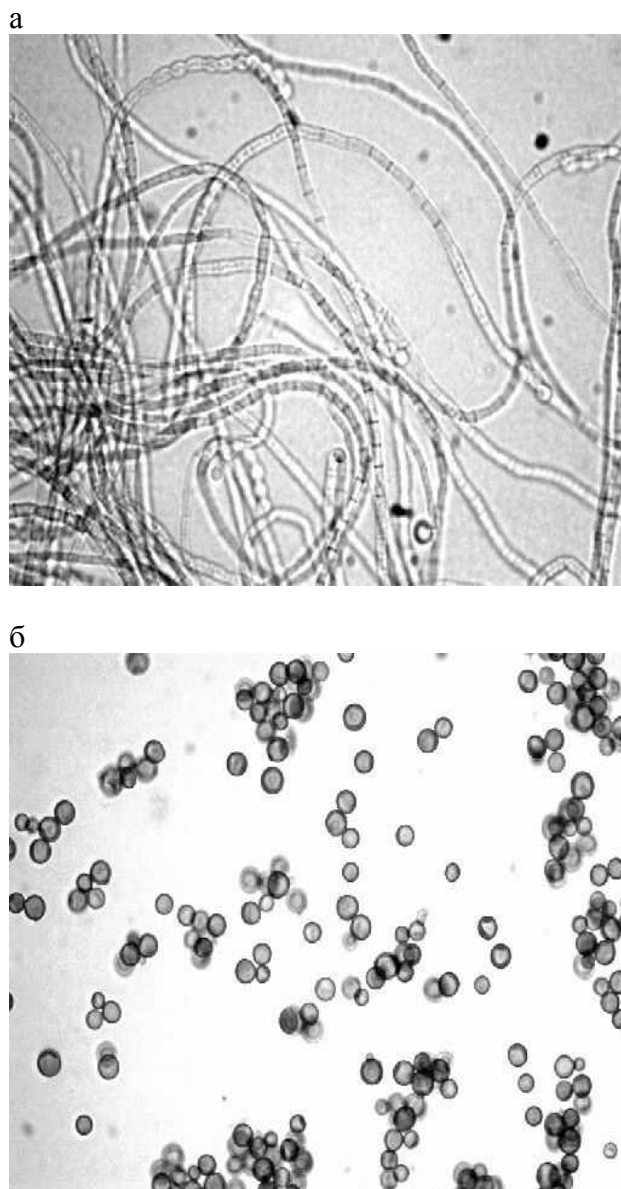


Рис. 1. Увеличенные фотографии двух клеточных форм *P.exophialae* (ch 49):

а — мицелий, б — дрожжевые клетки

вания "образа" среды следует использовать программы и алгоритмы распознавания образов. Под составом среды следует понимать баланс клеточных форм, основными из которых являются мицелий (см. рис. 1, а) и дрожжи (см. рис. 1, б). Кроме того, существуют псевдодрожжи, псевдомицелий, сарциноподобные клетки и ряд других форм.

Таким образом, описав и от моделировав процесс самоорганизации КНМГ как открытой биологической системы, можно получить отклик чувствительного элемента на внешнюю среду.

Сформулированная подобным образом концепция позволяет создать нелинейный хемосенсор, включающий: а) самоорганизующуюся КНМГ в качестве естественного чувствительного элемента, б) фотометрический (или аналогичный) детектор, в) персональный компьютер с пакетом прикладных программ. Последний обеспечивает формирование "образа" среды, его распознавание, анализ и сопоставление с границами классов ("безопасная среда", "опасная среда" и т. п.). В принципе, собственно анализ изображения по двумерному (или трехмерному) массиву результатов фотометрических измерений может быть отделен от двух первых стадий как по времени, так и по пространству.

Самоорганизующаяся колония представляет собой совокупность индивидуальных чувствительных элементов естественного происхождения, находящихся в грибных клетках. В процессе развития КНМГ потребляет питательные вещества извне и вырабатывает жидкие продукты метаболизма [4]. Описанный выше хемосенсор, в конечном счете, создает "образ" окружающей среды, основываясь на структуре КНМГ и достигнутом балансе клеточных форм.

Имеется очевидное сходство описанного выше хемосенсора с мультисенсорными устройствами "электронный нос" и "электронный язык". Специфика состоит в том, что: а) чувствительный элемент имеет естественное происхождение; б) число чувствительных элементов весьма велико (сотни и тысячи), что многократно больше, чем может быть реализовано в "электронном языке" (порядка 10–20); в) имеет инвазивное действие по отношению к анализируемой (или контролируемой) внешней среде. По аналогии этот мультихемосенсор можно назвать "*электронный рот*" как устройство, частично "съедающее" среду и производящее выделение метаболитов.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА КОЛОНИИ. ЭЛЕМЕНТЫ ФОРМИРОВАНИЯ "ОБРАЗА" КОЛОНИИ

В работе [4] описаны три основных структуры КНМГ (стратегии развития), а именно: сплошной газон (равномерное зарастание), "умирание" колонии и промежуточная регулярная (кольцевая) структура. Пример последней иллюстрируется рис. 2.

Помимо структуры колонии (в первую очередь, стратегии развития) следует рассматривать баланс клеточных форм. Тем самым отклики чувствительного элемента будут представлять собой совокупность КНМГ для каждой из указанных ранее клеточных форм. "Образ" внешней среды будет строиться по этой совокупности.

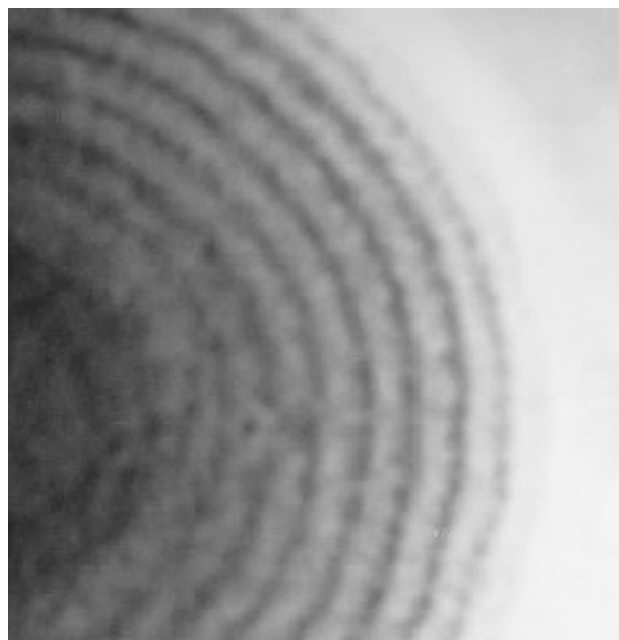


Рис. 2. Образование кольцевых волн в колонии *A.alternata*

Однако понятие структуры колонии не исчерпывается только стратегией развития. КНМГ может быть описана с использованием количественных параметров: число колец, ширина каждого кольца, максимум плотности на кольце, минимальное значение плотности между парой соседних колец и т. д.

В принципе, для формирующейся КНМГ в целом может быть введена количественная мера, характеризующая хаотичность (упорядоченность) распределения [5]. Однако обратная задача некорректна, и восстановление даже на качественном уровне стратегии развития колонии на основании интегральных оценок типа Шенноновской информации (либо энтропии) невозможно.

Ключевой этап разработки хемосенсора "электронный рот" — описание процесса самоорганизации КНМГ. Необходимо для этого процесса: а) сформулировать уравнения баланса (кооперативного развития) полиморфных клеточных форм, основываясь на популяционных моделях в форме системы дифференциальных уравнений Лотки—Вольтерра (подобных системе "хищник—жертва") [6], и б) определить механизм и управляющие параметры самоорганизации колонии как открытой системы (поскольку это, прежде всего, система с переменными границами распространения и обменом с окружающей средой) [5].

Параметры, определяющие процесс самоорганизации КНМГ, в том числе и управляющие, должны в конечном счете представляться в раз-

мерном виде и являться либо измеряемыми характеристиками среды (например, концентрация питательного субстрата, коэффициенты диффузии субстрата и продуктов метаболизма), либо быть связанными с чувствительным элементом (скорость выработки продуктов метаболизма, скорость роста биомассы и т. д.). Однако математическая модель [4] процесса самоорганизации оперирует безразмерными параметрами. Идентификация этих параметров с соответствующими характеристиками среды, а также отделение влияния неизменяемых характеристик собственно чувствительного элемента (например, вид несовершенных грибов) от характеристик среды (в частности, температуры) также является сложной задачей, не в полной мере решенной к настоящему моменту. Вместе с тем важнейший базовый параметр модели [4] — коэффициент диффузии продуктов метаболизма — был оценен на основе метода квазиточечного источника метаболитов, как это показано в [7].

Тем самым заложены теоретические и методические основы разработки нелинейного хемосенсора для анализа (контроля) окружающей среды на основе естественного чувствительного элемента — КНМГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности применения хемосенсора "электронный рот", главным образом, определяются условиями, допускающими развитие КНМГ.

1. Близость условий к естественным. Например, температура от -10 до $+50$ °С, давление, соизмеримое с атмосферным и т. д.

2. Нежелательность использования в условиях, когда вырабатываемые продукты метаболизма существенно влияют на окружающую среду (организм живого человека; технологические материалы, чувствительные к воздействию малых концентраций кислот и т. д.).

3. Возможность временного разделения стадий самоорганизации колонии и ее фотометрического измерения и последующего распознавания образов. В частности, ПК может быть отделен от самого сенсора, в котором достаточно разработать соответствующий интерфейс.

4. Достаточно длительные времена анализа (до нескольких суток).

При этом описанный выше хемосенсор "электронный рот" может быть создан искусственно. Тогда имеет смысл задача поиска вида несовершенного мицелиального гриба, обеспечивающего либо максимальный отклик на окружающую среду, либо максимальное быстроедействие, либо иную задачу оптимизации.

Однако и любая естественно развивающаяся

КНМГ может интерпретироваться с позиций чувствительного элемента "электронного рта", а по структуре формирующейся колонии можно проанализировать "образ" среды.

Благодарности

Автор благодарен д. т. н., проф., директору Института аналитического приборостроения РАН В.Е. Курочкину, сотрудникам кафедры биофизики Санкт-Петербургского государственного университета д. б. н. Л.К. Паниной, к. б. н. Е.В. Богомоловой, Е.Ю. Быстровой и Е.О. Цветковой за совместную работу и плодотворные научные дискуссии, способствовавшие написанию данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов Ю.Г. Мультисенсорные системы в аналитической химии (электронный нос и электронный язык) // Каталог рефератов и статей Межд. форума "Аналитика и аналитики", 2–6 июня 2003 г., Воронеж, Россия. Т. 1. С. 19.
2. Ermolenko Yu., Yoshinobu T., Mourzina Yu. et al. The hybrid potassium/calcium sensor based on laser scanned silicon transducer for multi-component analysis // Abstr. of IUPAC Intern. Congress on Analytical Sciences, 2001, Tokyo, Japan. P. 195–196.
3. Легин А.В., Рудницкая А.М., Курсанов Д.О. и др. "Электронный язык" для сельскохозяйственных приложений // Каталог рефератов и статей Межд. форума "Аналитика и аналитики", 2–6 июня 2003 г., Воронеж, Россия. Т. 1. С. 244.
4. Буляница А.Л., Быстрова Е.Ю., Богомолова Е.В., Панина Л.К., Курочкин В.Е. Модель образования пространственно-временных периодических структур в колониях мицелиальных грибов // Журнал общей биологии. 2000. Т. 61, № 4. С. 400–411.
5. Буляница А.Л., Курочкин В.Е. Исследование процессов упорядочивания в открытых системах (на примере эволюции колонии несовершенных мицелиальных грибов) // Научное приборостроение. 2000. Т. 10, № 2. С. 43–49.
6. Буляница А.Л., Курочкин В.Е., Богомолова Е.В., Панина Л.К. Математическое моделирование мицелиально-дрожжевых переходов у диморфных грибов // Тезисы 9-й Межд. конф. "Математика. Компьютер. Образование", 29 января–2 февраля 2002 г., Дубна, Россия. С. 179.
7. Буляница А.Л., Быстрова Е.Ю., Курочкин В.Е., Панина Л.К., Богомолова Е.В. Исследование процесса образования продуктов метаболизма при формировании колонии несовершенных

мицелиальных грибов // Научное приборостроение. 2000. Т. 10, № 4. С. 17–21.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 7.07.2003.

A CHEMOSENSOR BASED ON A SELF-ORGANIZED IMPERFECT FUNGUS COLONY ("ELECTRONIC MOUTH")

A. L. Bulyanitsa

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

A concept of a chemosensory analyzer based on a sensitive element of natural origin, an imperfect mycelial fungus colony (IMEC) is offered. A fungal cell can be treated as a set of weakly selective sensors responding to environmental composition, temperature, illumination. Thus one can see here a certain similarity to multisensors like "electronic nose" and "electronic tongue". But the self-organization of IMEC implies consumption of the substrate and producing metabolites into the environment. The latter suggests the name "electronic mouth" for such a chemosensor.