

# **ПРИРОДА**

№ 6, 2005 г.

**Вавилин В.А.**

## ***Автокатализ и флуктуации в природе***

© “Природа”

**Использование и распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции**



**Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”**  
(грант РФФИ 03-07-90415)

[vivovoco.nns.ru](http://vivovoco.nns.ru)  
[vivovoco.rsl.ru](http://vivovoco.rsl.ru)  
[www.ibmh.msk.su/vivovoco](http://www.ibmh.msk.su/vivovoco)

# Автокатализ и флуктуации в природе

В.А.Вавилин

**С**истематическим исследованием автокаталитических процессов мне пришлось заниматься дважды: в студенческие годы и гораздо позднее, исследуя автоколебательные химические и анаэробные микробиологические системы. Все эти годы новая область знаний, относящаяся к периодическим химическим реакциям, развивалась как автокаталитический процесс.

Еще в 1798 г. Томас Мальтус, предположив, что число рождающихся младенцев пропорционально общему числу людей, применил закон геометрической прогрессии для описания роста народонаселения. Этот закон эквивалентен уравнению экспоненциального роста:

$$\frac{dN}{dt} = \mu N, \quad N(t) = N_0 e^{\mu t}, \quad (1)$$

где  $N$  — численность,  $N_0$  — численность в начальный момент  $t = 0$ ,  $\mu$  — удельная скорость размножения. Чарлз Дарвин, занимаясь расчетами, прогнозирующими заселенность Земли тем или иным биологическим видом, использовал результаты Мальтуса для своей теории естественного отбора, согласно которой выживают наиболее приспособленные организмы.

© Вавилин В.А., 2005



**Василий Александрович Вавилин**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института водных проблем РАН. Область научных интересов — химическая кинетика, динамика сообществ микроорганизмов, математическое моделирование экологических процессов. Член международного авторского коллектива, создавшего общую имитационную модель анаэробных микробиологических процессов (ADM1).

П.Ферхюльст, описывая в 1838 г. феномен ограничения роста популяции, предположил, что одновременно с ростом популяции организмы погибают из-за «тесноты» — при встрече двух индивидов. Его уравнение, более известное сейчас как логистическое, записывается в виде

$$\frac{dN}{dt} = \mu N(1 - N/K), \quad N(t) = \frac{KN_0}{N_0 + (K - N_0)e^{-\mu t}}, \quad (2)$$

где  $K$  — предельная величина популяции для условий среды. При этом речь уже не идет о непосредственной гибели особей при столкновении, а принимается, что при стремлении численности  $N$  к предельному значению  $K$  скорость роста снижается. Традиционно такую зависимость объясняют тем, что пищевые ресурсы в конкретной среде ограничены и могут обеспечивать лишь определенное число особей  $K$ .

В условиях ограниченного роста популяции и единственном пищевом ресурсе (субстрате) вместо модели (2) получила признание модель Ж.Моно (1942), которую используют для описания микробиологических систем с переменными в виде концентраций (численность или масса на единицу объема):

$$\frac{dB}{dt} = \mu_m B \frac{S}{K_s + S} - k_d B, \quad \frac{dS}{dt} = -\frac{\mu_m}{Y} B \frac{S}{K_s + S}, \quad (3)$$

где  $B$  — биомасса;  $S$  — субстрат;  $\mu_m$  — максимальная удельная ско-

рость роста биомассы;  $k_d$  — константа отмирания;  $K_s$  — константа полунасыщения;  $Y$  — экономический коэффициент, отражающий эффективность трансформации субстрата в биомассу. По этой модели численность (биомасса) организмов уменьшается при исчерпании ресурса.

Начиная с работ А.Лотки (1925) и В.Вольтерры (1931) широкое признание получила так называемая модель хищник—жертва, когда популяция одних организмов становится пищей для других:

$$\frac{dN_1}{dt} = \mu N_1 - \alpha N_1 N_2, \quad \frac{dN_2}{dt} = \beta N_1 N_2 - \lambda N_2, \quad (4)$$

где  $N_1$  — численность жертвы,  $N_2$  — численность хищника,  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты сокращения численности жертв и роста численности хищников,  $\lambda$  — константа скорости отмирания хищника. Система (4) имеет периодическое решение, что привлекло к ней внимание многочисленных исследователей.

Термин «автокатализ» был введен для определения химических реакций, когда какой-либо из ее продуктов служит катализатором и ускоряет их. Для описания таких автокаталитических реакций также применяется уравнение (2), однако здесь используется концентрационная переменная (масса на единицу объема). В уравнениях (1–4) принимается, что процесс идет синхронно во всем пространстве системы. В сосредоточенных химических системах пренебрегают диффузией вещества, которую считают более быстрой, чем сам химический процесс. Тогда математическая модель записывается обыкновенными дифференциальными уравнениями (такие модели называются точечными). В распределенных системах диффузия становится значимой, и в этом случае динамические переменные математической модели необходимо считать функциями не только времени, но и пространства. Для логистического уравнения (2) и одномерного пространства с координатой  $x$  соответствующее уравнение записывается в виде

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \mu N(1 - N/K), \quad (5)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии. Решая задачу распространения вида в пространстве, Р.Фишер и независимо А.Н.Колмогоров и другие в 1937 г. впервые получили решения уравнения (3) в виде бегущих плоских волн, вводя движущуюся систему координат  $x - vt$ , где  $v$  — скорость движения фронта. Величина  $v$  постоянна и пропорциональна  $\sqrt{\mu D}$  и зависит как от скорости размножения  $\mu$ , так и от коэффициента диффузии  $D$ . При этом скорость движения фронта может значительно превосходить скорость диффузии. Аналогично решили задачу для распространения пламени в химической системе Я.Б.Зельдович и Д.А.Франк-

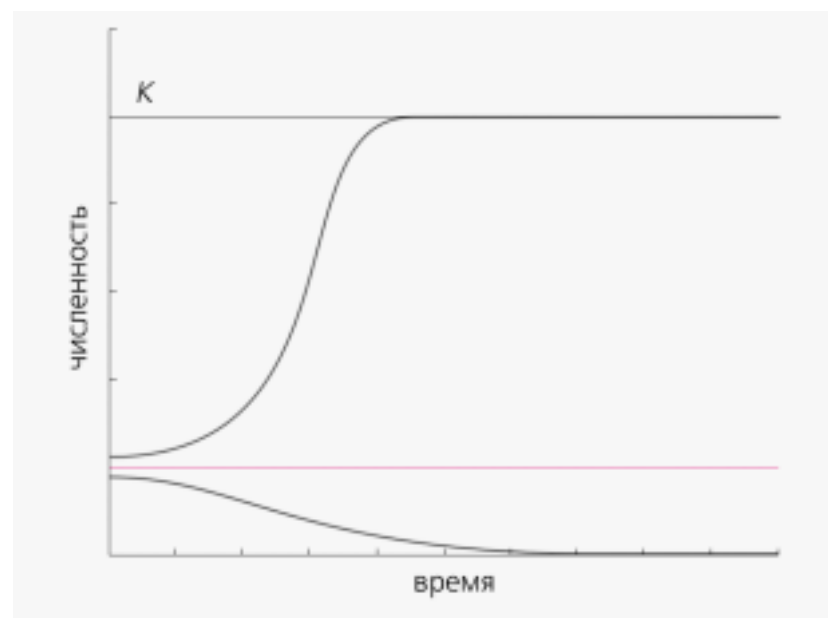
Каменецкий. Было показано, что фронт горения движется с постоянной скоростью, не зависящей от начальных условий, а кинетические процессы не дают волновому фронту размываться из-за диффузии.

Модели (2–5) давно стали классическими в экологии и химической кинетике. В значительной мере они лишь формально описывали рост популяций и химические реакции, не отражая суть механизмов этих процессов. Так, для химической кинетики в качестве элементарных принимаются парные взаимодействия, а автокатализ «требует» реакции с числом переменных заведомо больше одного. В многостадийном механизме некоторые стадии быстро достигают квазистационарного состояния и далее следуют за более медленным процессом. Наблюдения и опыты Р.Перля, Г.Ф.Гаузе и других показали справедливость уравнения (2) для одноклеточных организмов, но рост популяций высших организмов им уже не описывался. Интенсивное размножение, имеющее характер эпидемии, часто происходит, когда численность (или концентрация) превышает некоторый порог  $b$ . Тогда вместо уравнения (2) применяется уравнение вида

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \mu N(1 - N/K)(N - b). \quad (6)$$

В целом модели (2–6) впервые отразили нелинейность внутренних связей в химических и экологических системах. Если для линейных уравнений существует одно стационарное состояние, то для нелинейных их несколько. Переход из одного состояния в другое может происходить за счет концентрационных флуктуаций.

В математике различные режимы точечных



Развитие и отмирание популяции в зависимости от начальных условий:  $K$  — предельная численность популяции, ее пороговое значение показано цветом. Если численность популяции ниже порогового значения, она отмирает.

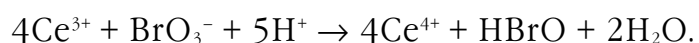
## ИСТОРИЯ НАУКИ

динамических систем классифицируются по типу поведения. Теория бифуркаций (разветвлений), анализ устойчивости стационарных решений и теория катастроф, развитые А.Пуанкаре, А.М.Ляпуновым и другими, позволяют исследовать поведение нелинейных динамических систем, далеких от равновесия, при изменении их параметров. Сегодня для сосредоточенных систем известны стационарные состояния в виде периодических, квазипериодических и хаотических колебаний, математическим выражением которых служат предельный цикл, тор и странный аттрактор. Начиная с Э.Лоренца (1961), изучавшего тепловую конвекцию в атмосфере, примеры странных аттракторов стали находить в различных нелинейных динамических системах. Для распределенных систем известны автоволновые процессы, пульсирующие и стационарные диссипативные структуры, химическая турбулентность и др.

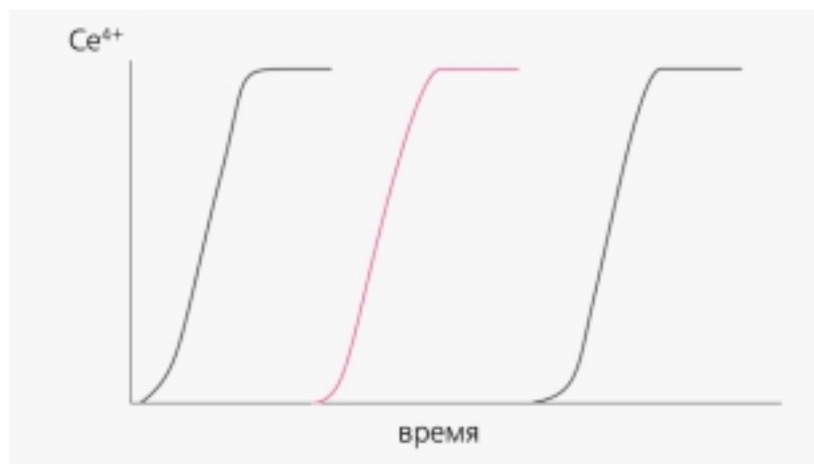
На практике интенсивное перемешивание среды усредняет пространственную концентрацию. В реальных условиях неидеальность перемешивания может приводить к новым эффектам в нелинейных динамических системах, которые адекватно описать детерминистическими уравнениями без учета флуктуаций нельзя [1]. Если система находится вблизи точек бифуркации, то ее неустойчивость вызывает повышенную чувствительность к флуктуациям, и в итоге система переходит из одного стационарного состояния в другое. Различают два типа флуктуаций: внешние и внутренние. В системах, имеющих автокаталитические стадии, возможно самоусиление внутренних флуктуаций.

### Флуктуации в автокаталитической химической системе

К настоящему времени широкую известность получила периодическая химическая реакция Белоусова—Жаботинского [2]. В ходе этой реакции в кислых условиях чередуются процессы окисления броматом и восстановления органической кислотой, протекающие в присутствии катализатора (ионов металла). Автокаталитическая реакция окисления (ключевая стадия) для ионов церия (наряду с церием использовались и комплексы железа, придающие раствору яркую окраску) записывается следующим образом:



Показано, что при интенсивном перемешивании она начинается лишь спустя некоторое время [3]. Такой индукционный период (или лаг-фазу) можно устранить, если ввести в систему продукт реакции  $\text{HBrO}$ . Была предложена схема, в которой активатором (размножающейся частицей), обеспечивающим автокатализ, служит молекула  $\text{HBrO}_2$  [4], но при значительных концентрациях бромид-иона ( $\text{Br}^-$  присутствует в системе изначально)

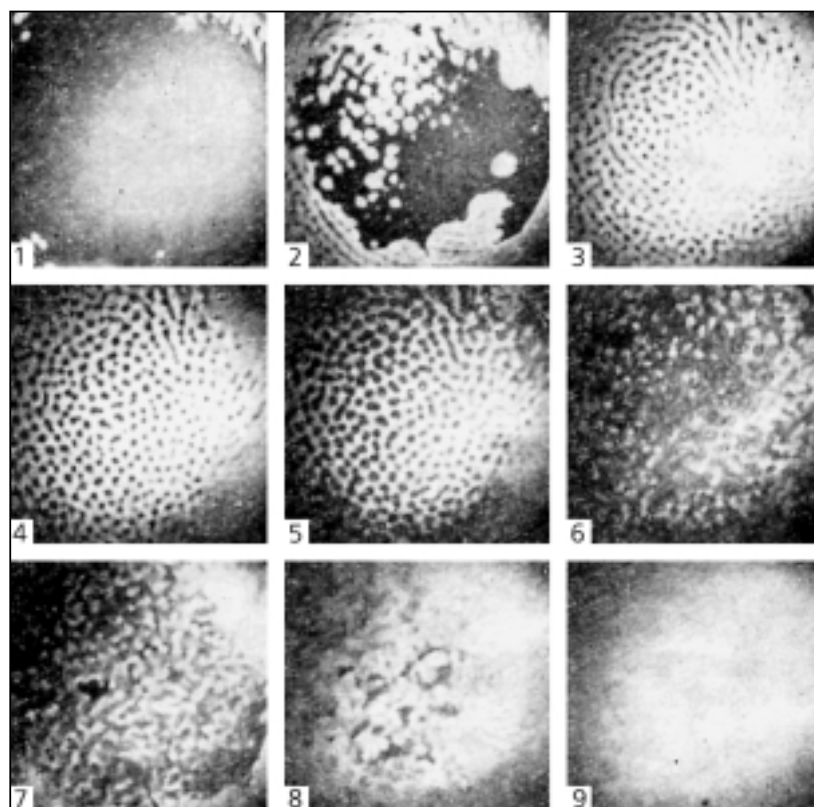


Кривые концентрации ионов церия в ходе автокаталитической реакции: добавка  $\text{Br}^-$  увеличивает лаг-фазу (справа); введение серебра  $\text{Ag}^+$ , связывающего  $\text{Br}^-$ , уменьшает ее (слева); без добавок — цветная кривая.

размножение не происходит.

Полный механизм периодической реакции Белоусова—Жаботинского известен сейчас как схема ФКН (Р.Филда, Е.Кереша и Р.Нойеса), в которой ключевую роль играют взаимоотношения активатор—ингибитор, влияющих на чередование реакций окисления и восстановления катализатора — ионов металла. Системы активатор—ингибитор открыты и для других периодических химических реакций [5].

Исследуя автокаталитическую реакцию в тон-



Последовательные снимки автокаталитической реакции в чашке Петри. Цифры 1—9 соответствуют различным моментам времени с интервалом 2 мин. Видно, что к третьему кадру образуется отчетливая ячеистая структура, которая существует ограниченное время и к восьмому кадру исчезает.

ком не перемешиваемом слое раствора (чашке Петри), мы обнаружили, что она начинается с некоторых локальных точек и затем распространяется по пространству [4]. Тщательная очистка реагентов не меняла динамику системы, что позволило допустить флуктуационный механизм появления очагов (зародышей). Очаг реакции можно создать искусственно в конкретном месте пространства, вводя  $Ag^+$ . Интенсивное перемешивание раствора, выравнивающее градиенты концентраций, значительно увеличило лаг-фазу. После накопления критической массы активных частиц процесс ускорялся при встряхивании реакционной смеси. Оказалось, что изначально реакцию можно провести за короткое время, начиная перемешивание только при достаточном объеме очагов. Разбросав их по пространству, можно поджечь весь объем.

П.Ванаг доказал флуктуационное образование очагов в структурированной среде (микроэмульсии) [6]. Используя теорию клеточных автоматов, он показал, что с увеличением объема реактора усиливается эффект перемешивания, поскольку увеличивается вероятность крупномасштабных флуктуаций. Последствия от таких событий превосходят сумму последствий от часто возникающих мелкомасштабных флуктуаций. Если перемешивание не очень интенсивное, то в нелинейной химической системе сохраняются микрообъемы, в которых концентрации реагентов могут заметно отличаться от средних. Чем больше распределение частиц по микрообъемам отличается от пуассоновского, тем сильнее поведение системы как целого отличается от поведения идеально пере-

мешиваемой, когда концентрации выравниваются. Усиленное перемешивание уменьшает характерный внутренний масштаб турбулентного движения, называемый размером Колмогорова, которому соответствуют наиболее мелкие турбулентные вихри или пульсации элементов жидкости.

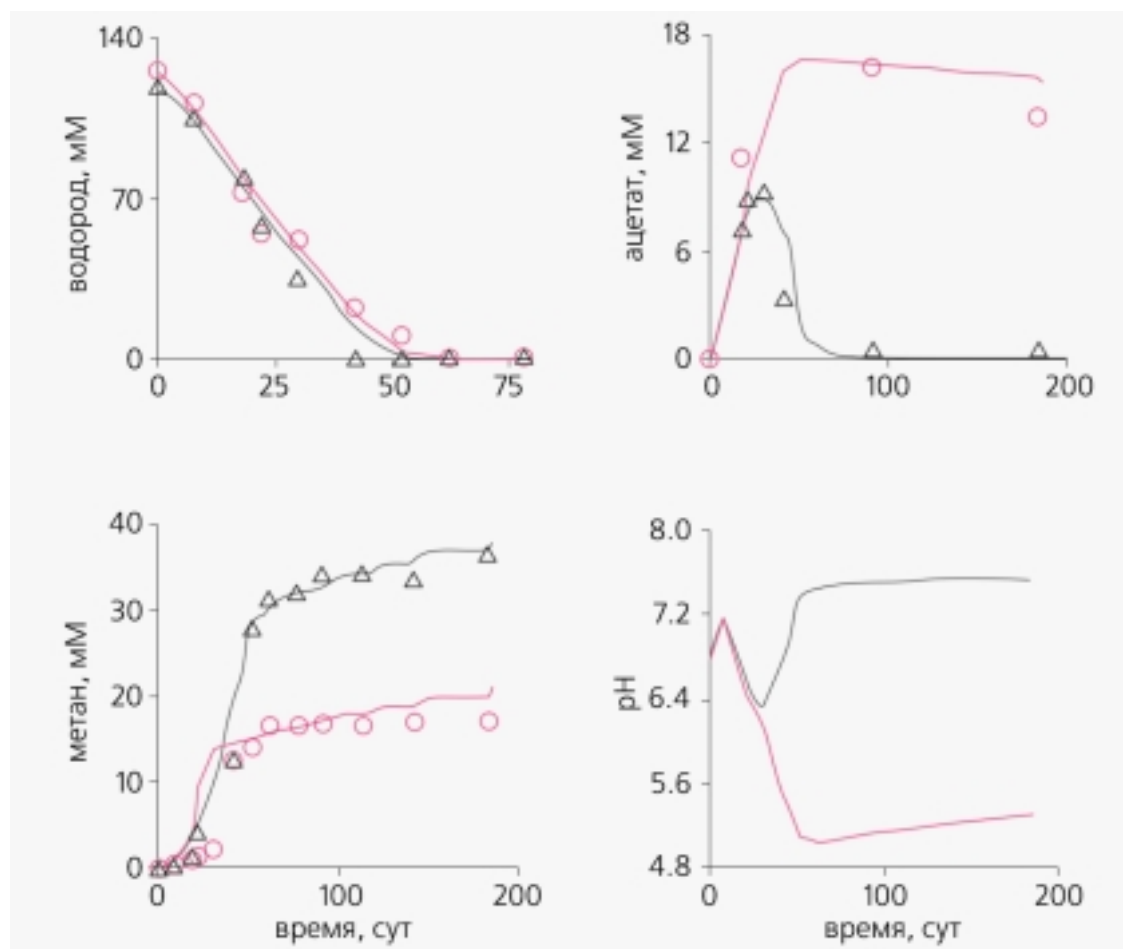
В распределенных нелинейных химических системах без перемешивания наличие подсистемы активатор—ингибитор может вызвать спонтанное образование диссипативных структур и волновые явления. Мне впервые удалось наблюдать возникновение ячеистой структуры в ходе автокаталитической реакции [7].

Детерминированный хаос в виде странного аттрактора с экстремальной чувствительностью траектории системы к начальным условиям оказался присущ и реакции Белоусова—Жаботинского.

## Флуктуации в анаэробных микробиологических системах

Микробиологические процессы, проходящие в отсутствие кислорода, характерны как для природных, так и технических систем. В разложении органических веществ участвует целое сообщество различных типов микроорганизмов, осуществляющих последовательно гидролиз, кислотогенез, ацетогенез и метаногенез. В ходе этих стадий из сложных молекул образуются жирные кислоты и конечные продукты — метан ( $CH_4$ ) и углекислый газ ( $CO_2$ ). Высокие концентрации продукта или субстрата могут ингибировать каждую реакцию, и в итоге конечный продукт  $CH_4$  может и не по-

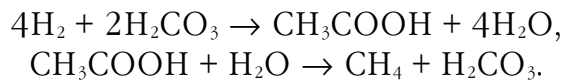
**Экспериментальные данные (символы) и результаты моделирования (кривые) поведения анаэробной микробиологической системы. Один и тот же опыт повторялся дважды, при этом были получены резко отличающиеся значения для водорода, ацетата, метана и pH. Численное моделирование показало, что небольшие различия в начальных концентрациях микроорганизмов приводят к резкому отличию решений.**



## ИСТОРИЯ НАУКИ

явиться. Поскольку микроорганизмы сами — активаторы (именно они размножаются), то мы имеем такие подсистемы, как активатор—ингибитор. В настоящее время поведению анаэробных микробиологических систем как нелинейных динамических систем уделяется особое внимание.

*Гомоацетогенез и метаногенез.* Метан образуется из водорода и диоксида углерода (особенно при низких температурах) через промежуточную стадию, гомоацетогенез:



Так, в тундровой почве при одинаковых условиях процесс, осуществляемый микроорганизмами, может закончиться на стадии ацетата, когда не весь субстрат ( $\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) превращается в метан [8]. Повышение температуры способствует полному разложению органического вещества до метана и диоксида углерода. Динамическая модель, учитывающая остановку метаногенеза высокими концентрациями ацетата, показала, что система находится вблизи точки бифуркации, когда концентрационные флуктуации могут изменить ее динамическое поведение. Такая неоднозначность обычно плохо воспринимается экспериментаторами: результаты часто считаются артефактами и не публикуются в научной литературе.

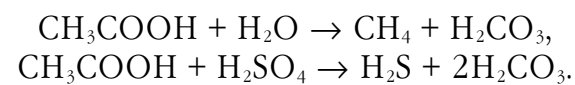
*Гидролиз и метаногенез.* Разложение твердых органических веществ, в том числе и твердых бытовых отходов, начинается с гидролиза, а заканчивается метаногенезом, при этом образуются промежуточные продукты (ацетат и другие жирные кислоты). Если процесс несбалансирован, накапливаются жирные кислоты (низкие значения

pH), что тормозит и гидролиз, и метаногенез. Традиционно считается, что для равномерного распределения гидролитических ферментов в анаэробном реакторе необходимо адекватное перемешивание. Мы обнаружили, что интенсивное перемешивание прекращает метаногенез [9].

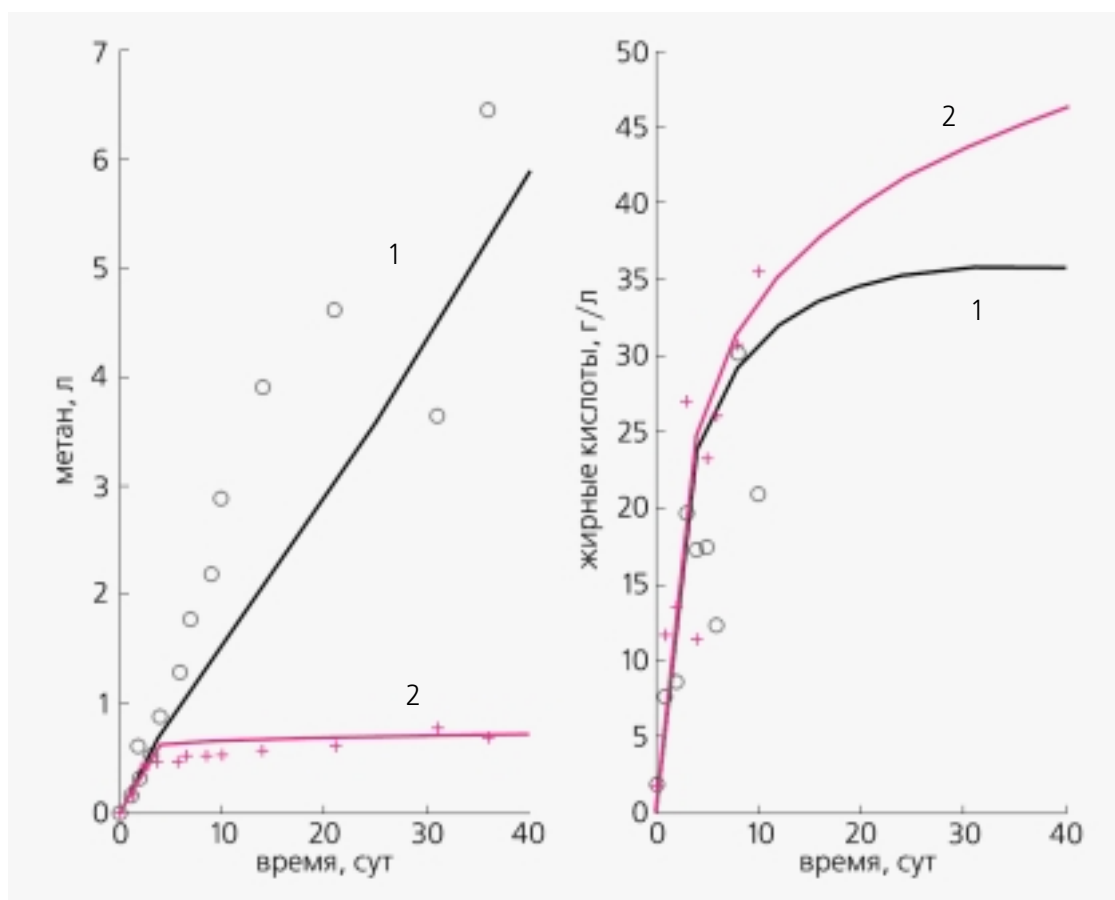
Двумерная модель реактора показала, что изначальное разделение зон активного метаногенеза и гидролиза/кислотогенеза способствует эффективному превращению бытовых отходов в метан, а интенсивное перемешивание блокирует метанообразование. Для выживания необходим достаточный размер зародыша.

При слабом перемешивании концентрационные флуктуации могут перевести системы с одного динамического поведения на другое. Интересно, что мозаичная структура наблюдается на городских свалках, где зоны активного метаногенеза и гидролиза/кислотогенеза соседствуют [10].

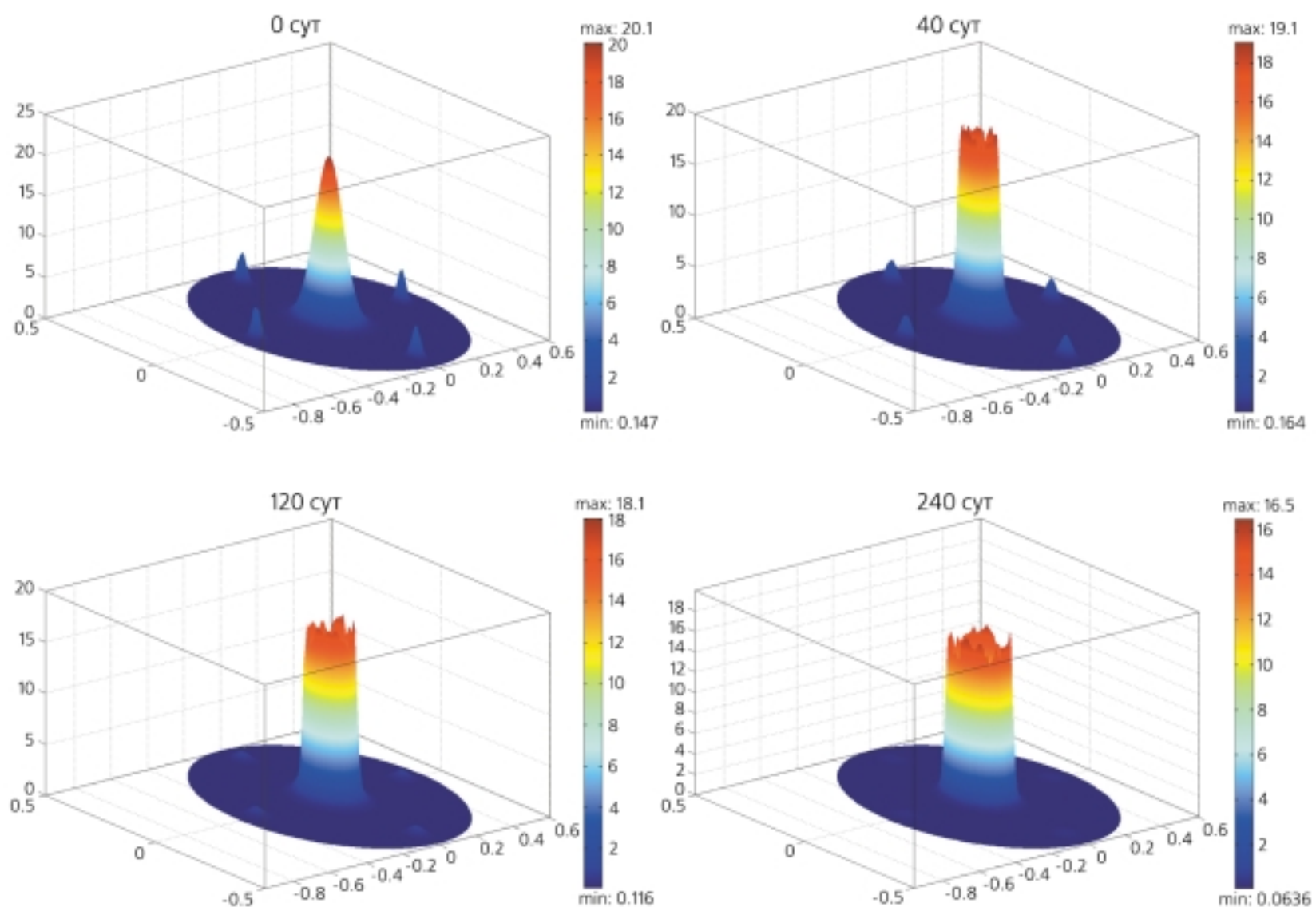
*Сульфат-редукция и метаногенез.* Г.Паркин и др. обнаружили резкие скачки концентраций ацетата и сульфата в анаэробной проточной системе, где одновременно шли метаногенез и сульфат-редукция [11, 12]:



Оказалось, что при высокой начальной концентрации сульфата прекращаются не только метаногенез, но и сульфат-редукция. Для объяснения немонотонного характера динамических кривых предложена кинетическая схема, учитывающая ингибирующее действие высоких концентраций сульфидов [13, 14]. Динамическая модель, соответствующая этой схеме, имела периодическое решение.



Зависимость метанообразования от перемешивания в процессе разложения твердых бытовых отходов: 1 — отсутствие перемешивания, 2 — интенсивное перемешивание. Кривые — численные решения двумерной модели, символы — экспериментальные данные. Метаногенез прекращается при интенсивном перемешивании, когда реакционное пространство однородно. Если перемешивания нет, жирные кислоты усваиваются микроорганизмами в метаногенных центрах (зародышах), отдаленных от зоны гидролиза/кислотогенеза.



Рост метаногенной популяции при разложении твердых бытовых отходов согласно двумерной модели для круга при пятипиковом начальном распределении биомассы. Развивается лишь центральный относительно большой пик биомассы, при этом дефицит органического вещества и отмирание микроорганизмов со временем вызывают падение их концентраций в центре. Диффузия жирных кислот, ингибирующих рост метаногенов, быстро приводит к исчезновению периферийных пиков.

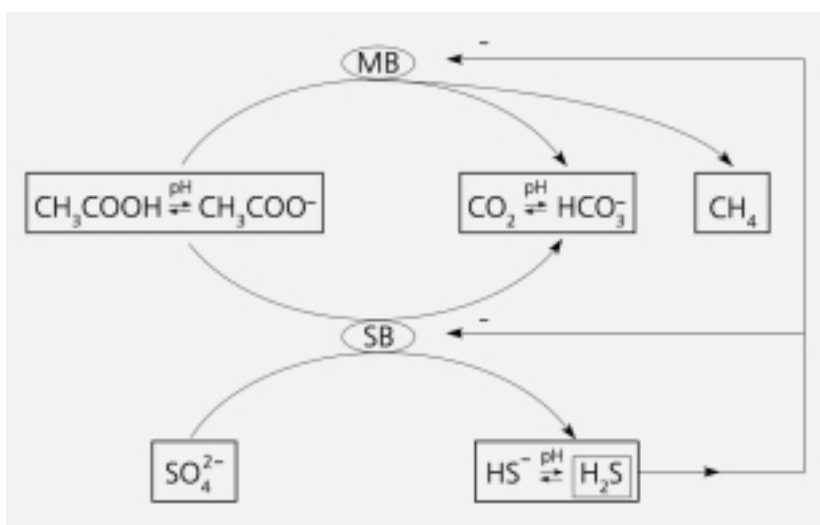


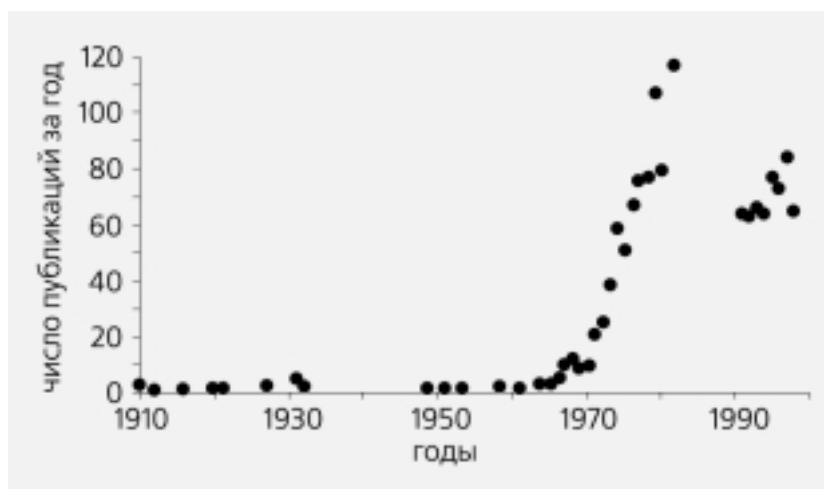
Схема взаимодействия метаногенных (MB) и сульфат-редуцирующих (SB) бактерий, конкурирующих за ацетат  $\text{CH}_3\text{COOH}$ . Сероводород в неионизированной форме  $\text{H}_2\text{S}$ , концентрация которой регулируется величиной pH, останавливает не только метаногенез, но и сульфат-редукцию.

## Развитие науки как автокаталитический процесс

Еще в 1969 г. В.В.Налимов и З.М.Мульченко в своей монографии, названной «Наукометрия», рассматривали науку как информационный процесс, а ее развитие определяли по росту публикаций, количеству журналов, научных сотрудников и ассигнований в науку. Впервые в отечественной литературе упоминался индекс цитирования как важный показатель продуктивности ученого и темпов развития той или иной области науки.

Очевидно, что частота публикаций отражает количество людей, занятых в данной области, денежные средства, вложенные в нее, а также популярность предмета. Если данные исследования находятся вне основного русла научной мысли, количество публикаций не увеличивается. Именно так было и с колебательными химическими реакциями [15–17]. До середины 60-х годов про-

## ИСТОРИЯ НАУКИ



Динамика публикаций по колебательным химическим реакциям в мировой литературе. Видно, что экспоненциальный рост начался с середины 60-х. Сейчас уже во многих статьях упоминание реакции Белоусова—Жаботинского не сопровождается литературной ссылкой. Ее называют сокращенно БЖ-реакцией.



В.А.Вавилин и А.М.Жаботинский. Фото 2002 г.

шлого века научные публикации по колебательным реакциям носили эпизодический характер. Серьезные работы время от времени появлялись, но не привлекали достаточного внимания.

Современная история исследований колебательных химических реакций началась в 1951 г. с открытия Б.П.Белоусова. Его статью с феноменологическим описанием периодической реакции редакции известных химических журналов отклонили дважды. Лишь в 1959 г. ее сокращенный вариант вышел в малоизвестном «Сборнике рефератов по радиационной медицине». Это открытие могло бы так и остаться незамеченным. Но в 1961 г. биохимик С.Э.Шноль предложил своему аспиранту А.М.Жаботинскому исследовать механизм реакции Белоусова. Такая аспирантская тема стала возможной именно на физическом факультете МГУ с традициями изучения колебательных процессов. В марте 1966 г. состоялся Первый

всесоюзный симпозиум «Колебательные процессы в биологических и химических системах», в трудах которого появилось сразу восемь статей группы Жаботинского. К концу 60-х годов периодическая реакция, названная впоследствии реакцией Белоусова—Жаботинского, получила широкую известность. Фактически открытие Белоусовым колебательной химической реакции, продолжение работы Жаботинским и его группой — своего рода флуктуация, которая сменила латентный период исследований химических колебаний на экспоненциальный рост.

Формально роль активатора в развитии научных знаний выполняют научные публикации. Ингибитор здесь не столь очевиден: в какой-то мере это представления, не совпадающие или противоречащие новым результатам. Сами публикации создаются конкретными авторами, а творческий процесс — следствие их таланта, работоспособности, удачи. Согласно модели Рида—Фроста, среди авторов выделяются индукторы (заражающие), реципиенты (воспринимающие) и покидающие ту или иную область науки. Аспиранты принадлежат к наиболее подвижной части научных сотрудников, приходящих в конкретную науку и легко из нее уходящих. Начальные работы, как правило, основаны на личной инициативе индукторов и не опираются на значимую финансовую поддержку. Когда число реципиентов превышает пороговую величину, наступает своего рода эпидемия. При этом конкретная область науки становится «модной», а финансовая поддержка служит движущим фактором развития.

Реакция Белоусова—Жаботинского стимулировала появление новой области науки, а экспериментальные работы инициировали развитие современной теории нелинейных динамических систем. Наиболее полный анализ динамики научных знаний о периодических реакциях, становления различных научных школ, проведенных конференциях, влияния наиболее значимых статей на творческий процесс содержится в работе М.Бургера и Э.Буйдошо [17]. В качестве индикатора развития использовались такие показатели, как число публикуемых статей в ведущих журналах и их цитируемость, число активно работающих ученых, количество журналов, публикующих работы в данной области и др.

В настоящее время знания по анаэробным микробиологическим системам с нелинейными динамическими процессами накапливаются, но экспериментальные и теоретические работы развиваются пока разрозненно. Кто знает, но может быть, создание обобщенных динамических моделей анаэробных систем типа ADM1, опубликованной в 2002 г., послужит флуктуацией к будущему экспоненциальному росту этой области науки. На конгрессе по анаэробным процессам, прошедшем в Монреале в 2004 г., модель ADM1 цитировалась более 20 раз. Социальный заказ для развития на-

зрел: это и проблема глобального потепления, что в немалой степени связано с анаэробными (природными и антропогенными) экосистемами, поставляющими метан и углекислый газ в атмосферу, и проблема перехода к возобновляемым источникам энергии, когда в биотехнологических системах органическое вещество трансформируется в биотопливо в виде метана или водорода.

## Вместо эпилога

Автокатализ, как и волновые процессы, характерны для многих динамических систем в приро-

де и обществе. Распространение эпидемий, религиозных учений, моды, научных знаний — лишь некоторые примеры подобных процессов, у которых всегда есть взлеты и падения. К сожалению, приходится констатировать, что в настоящее время развитие российской науки и ее престиж резко падают, а научный сотрудник для российского общества становится скорей именем нарицательным. В новых неразвитых рыночных условиях старая наука, финансируемая «сверху», стала невостребованной и поэтому избыточной, а новая наука, иницируемая «снизу», с широкой системой грантов и свободной конкуренцией, еще не создалась. ■

## Литература

1. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М., 1979.
2. Жаботинский А.М. Концентрационные колебания. М., 1974.
3. Вавилин В.А., Жаботинский А.М. // Кинетика и катализ. 1969. Т.10. С.83—88.
4. Вавилин В.А., Заикин А.Н. // Кинетика и катализ. 1971. Т.12. С.309—313.
5. Колебания и бегущие волны в химических системах / Под ред. Р.Филда и М.Бургер. М., 1988.
6. Ванаг П. // Автореф. дис. д.ф.-м.н. Институт хим. физики им.Н.Н.Семенова. М., 1996.
7. Вавилин В.А. // Кинетика и катализ. 1971. Т.12. С.1045—1047.
8. Vavilin V.A., Lokshina L.Ya., Rytov S.V. et al. // Biores. Technol. 2000. V.71. P.195—209.
9. Vavilin V.A., Angelidaki I. // Biotechn. Bioengn. 2005. V.89. P.113—122.
10. Nozhevnikova A.N., Lifshitz A.B., Lebedev V.S. et al. // Chemosphere. 1993. V.26. P.407—417.
11. Parkin G.F., Lynch N.A., Kuo W.C. et al. // J. WPCF. V.62. P.780—788.
12. O'Flaherty, Colleran E. // Biores. Technol. 1999. V.68. P.101—107.
13. Vavilin V.A., Vasiliev V.B., Rytov S.V. et al. // Biores. Technol. 1994. V.49. C.105—119.
14. Fomichev A.O., Vavilin V.A. // Ecol. Modelling. 2001. V.95. P.133—144.
15. Шноль С.Э. Герои, злодеи и конформисты российской науки. М., 2001.
16. Вавилин В.А. Автоколебания в жидкофазных химических системах // Природа. 2000. №5. С.19—24.
17. Бургер М., Буйдошо Э. // Колебания и бегущие волны в химических системах. Ред. Р.Филд, М.Бургер. М., 1988. С.608—647.

Р.Стекел (R.Steckel; Университет штата Огайо, США), измерив нескольких тысяч скелетов из могил Северной Европы, пришел к выводу: средний рост мужчины XI—XII вв. равнялся 173.4 см, т.е. почти не отличался от нынешнего. В конце XII в. этот показатель начал снижаться и стабилизировался с наступлением XVII в. на уровне, меньшем примерно на 6.5 см. Стекел объясняет эту динамику тем, что в малый ледниковый период продуктивность сельского хозяйства упала и люди не могли питаться столь же полноценно, как в предыдущие века.

Sciences et Avenir. 2004. №692. P.24 (Франция).

Три британских научных учреждения — Лондонский музей естественной истории, Лондонское зоологическое общество и Институт генетики Ноттингемского университета — договорились о создании первого в мире банка ДНК видов животных, находящихся под угрозой вымирания. Проект называется «Замороженный ковчег», возглавляет его Ф.Рейнбоу (Ph.Rainbow). В первую очередь планируется собрать в общий список все существующие в мире коллекции ДНК: по отдельности они страдают пробелами и труднодоступны.

Science. 2004. V.305. №5684. P.603 (США).

Почему письменность шумеров, возникшая примерно 5 тыс. лет назад, использовалась после того, как уже умер их разговорный язык, еще на протяжении почти двух тысячелетий?

Филолог Д.Браун (D.Brown; Университетский колледж Лондона) объясняет это бурным развитием астрологии. Продажа гороскопов, написанных клинописью, приносила большие доходы писцам. Они передавали свое ремесло из поколения в поколение и вовсе не хотели оставлять столь прибыльное занятие.

La Recherche. 2004. №378. P.22 (Франция).

История