Залипаева Л.В., Замышляев В.А., Михайлов П.И., Федорычев А.А., Товпенец М.В.
Влияние радиации и гипوماгнитных условий на химические автоколебательные реакции и автоволны

*«Средняя общеобразовательная школа № 3 г. Пушкино»
(Россия, Пушкино)*

doi: 10.18411/sr-10-12-2018-02

idsp: sciencerussia-10-12-2018-02

Аннотация

Статья содержит аргументы, доказывающие взаимосвязь химических автоколебаний и некоторых процессов в живых организмах, включая человека. В связи с этим, рассматриваемый в статье класс автоколебательных реакций Белоусова-Жаботинского может служить удобной моделью для изучения колебательных и волновых процессов в активных средах. Подвергая внешнему воздействию систему, в которой происходит химическая автоколебательная реакция, можно в какой-то степени прогнозировать результат этого воздействия на биологические системы.

В статье рассматривается механизм реакции Белоусова-Жаботинского, приводятся примеры и других химических автоколебательных реакций. Объясняется, при каких условиях могут распространяться автоволны. Приводятся примеры распространения волн возбуждения (автоволн) в живых организмах.

Рассматривается влияние негативных космических факторов, а именно, радиации и гипوماгнитных условий на автоколебательные процессы.

Ключевые слова: автоколебания, автоволны, реакция Белоусова-Жаботинского, радиация, гипوماгнитные условия, физика, химия, биология, биологические системы, НИИЯФ МГУ, МГУ, магнитное поле.

Введение

Любители химии, конечно, знают о классе автоколебательных реакций, открытых в 1951 году Борисом Павловичем Белоусовым, а затем изученных и описанных учеными из МГУ под руководством Симона Эльевича Шноля и Анатолия Марковича Жаботинского.

Белоусов открыл первую автоколебательную реакцию, когда пытался найти неорганический аналог цикла Кребса (широко представленного в организмах животных, растений и микробов пути окислительных превращений ди- и трикарбоновых кислот, образующихся в качестве промежуточных продуктов при распаде и синтезе белков, жиров и углеводов). Белоусов неоднократно подчеркивал, что открытая им реакция имеет прямые аналогии с процессами, происходящими в живой клетке [1, 2].

В 1969 году Жаботинский с коллегами обнаружили, что если реагирующую смесь разместить тонким плоским слоем, в нём возникают волны изменения концентрации, т.е. автоволны, которые видны невооружённым глазом в присутствии индикаторов. Жаботинский с сотрудниками провели исследования и доказали, что автоколебания и автоволны существуют не только в химических, но и в биологических системах. Нарушение же распространения автоволн может привести к сбоям функционирования различных органов и систем организма [3, 4].

В наше время одной из главных задач науки является покорение человеком космоса. Но, при дальних космических полетах, как сами космонавты, так и элементы биорегенеративной системы жизнеобеспечения человека будут подвергаться воздействию негативных факторов.

Основным фактором космического пространства, крайне отрицательно действующим на живые системы, является повышенный радиационный фон. В дальних космических полётах он создается галактическими и солнечными космическими

лучами, в которых присутствуют тяжелые заряженные частицы с высокой ионизационной способностью.

Также известно, что в космическом пространстве магнитное поле на 3 – 5 порядков ниже магнитного поля Земли, т.е. там возникают гипомангнитные условия (ГМУ). Проблема длительного пребывания космонавтов вне привычного геомагнитного поля и воздействия ГМУ на биологические объекты также может оказаться весьма значимой.

Явления, возникающие в ходе химических автоколебательных реакций и автоволн, моделируют многие процессы самоорганизации, происходящие в живых системах, т. е. класс реакций Белоусова-Жаботинского (Б-Ж) может служить удобной моделью для изучения колебательных и волновых процессов в активных средах.

Подвергая внешнему воздействию систему, в которой происходит химическая колебательная реакция, можно моделировать и в какой-то степени прогнозировать результат этого воздействия на биологические системы.

Поэтому изучение влияния радиации и гипомангнитных условий на химические автоколебательные реакции и автоволны является важной научной задачей.

Химические автоколебания

Реакция Б-Ж, как известно [1], является колебательной реакцией с возбудимой кинетикой (рис. 1).

Рис. 1. Схема реакции Белоусова-Жаботинского

Течение реакции проявляется периодическим изменением цвета раствора от бесцветного (Ce^{3+}) к жёлтому (Ce^{4+}) и обратно. В ней при взаимодействии ионов Ce^{4+} с малоновой кислотой происходит их восстановление (I):

Объяснить это можно так: при взаимодействии ионов Ce^{4+} с кислотой происходит их восстановление. Образующийся в ходе реакции Ce^{3+} должен затем вступить в реакцию с бромат-ионом (II), приводящую к стационарному распределению церия между степенями окисления.

Однако эта реакция относится к автокаталитическим, и в ней самоускоряющемуся протеканию предшествует период индукции. Реакция включается не сразу, и поэтому за время периода индукции практически все ионы Ce^{4+} переходят в Ce^{3+} . Светло-желтая окраска раствора, обусловленная поглощением света в видимой области спектра комплексом Ce^{4+} , исчезает. По завершении периода индукции происходит самоускоряющийся быстрый переход ионов Ce^{3+} в Ce^{4+} , и раствор окрашивается вновь. Другими словами, пока весь Ce^{4+} не перейдет в Ce^{3+} , последний не начинает окисляться. Т.е. реакция какое-то время идет, затем останавливается, затем снова начинается и так продолжается до тех пор, пока не будут израсходованы все исходные реагенты.

Эффект ещё более заметен в присутствии индикатора ферроина. Если вместо ионов церия использовать ионы железа Fe^{2+} , то раствор в колбе может долго, со строгой, как часы, периодичностью изменять цвет во всем видимом диапазоне от рубиново-красного до небесно-голубого.

Но класс автоколебательных реакции не ограничен лишь реакцией Б-Ж. В эту группу входит около 100 реакций. Одна из наиболее "красивых" и наглядных автоколебательных реакций - реакция Бриггса-Раушера.

При взаимодействии пероксида водорода, йодноватой кислоты, сульфата магния (II), серной и малоновой кислот и крахмала возникает колебательная реакция с переходами бесцветный – золотой – синий. При нормальных условиях, такая реакция способна идти на протяжении 0.5-1 часа.

Автоколебания и автоволны в биологических процессах

В 70-е годы Жаботинский с сотрудниками провели исследования открытых ими в 1969 году автоволн [3, 4]. Было доказано, что автоколебания и автоволны существуют не только в химических, но и в биологических системах. Одним из основных механизмов, с помощью которого осуществляется передача сигналов в живом организме, является распространение волн возбуждения, которые связаны с автоколебательными процессами.

Например, волны возбуждения могут распространяться по клеткам скелетной мускулатуры, кишечника, мочевого пузыря, кровеносных сосудов, сердца. В сердце имеется собственная проводящая система, которая обеспечивает его автоматизм – способность непроизвольно сокращаться под действием аутоимпульсов. В организме волны возбуждения обеспечивают электромеханическое сопряжение и координацию сокращений мышечных структур, синхронизацию работы отдельных частей и систем органов, работу двигательного аппарата, осуществляют многие жизненно важные функции. Также одним из наиболее ярких примеров автоволновых процессов в живых системах является распространение нервных импульсов [5].

Нарушение распространения волн возбуждения приводит к нарушениям функционирования различных органов и систем организма, а также к различным серьезным заболеваниям.

Модельные исследования автоволновых процессов реакции Белоусова - Жаботинского внесли важный вклад в изучение возможностей управления автоволновыми процессами в таких жизненно важных органах, как мозг и сердце. Было показано, что с помощью этой реакции можно моделировать большое разнообразие процессов, в том числе формирование спиральных волн. В целом данный подход не должен быть обязательно тесно связан с рассмотрением физической основы систем, но призван отражать общую синергетическую природу их поведения.

Одно из основных приложений исследования источников выше названных спиральных волн в возбудимых средах связано с изучением различных патологий сердечной мышцы. Так нарушение распространения автоволн в сердце может вызывать аритмии, а образование спиральных автоволн — фибрилляцию желудочков, при которой нарушается синхронизация сокращений отдельных мышечных элементов и сердце перестает нагнетать кровь, что приводит к мгновенным летальным исходам.

Медицинские приложения теории автоволновых процессов не ограничиваются фибрилляцией миокарда. Открыты, например, патологические автоволновые процессы, возникающие в нервных сетях коры головного мозга при эпилепсии. Показан автоволновой процесс распространения депрессии в сетчатке глаза и др.

Исследование воздействия радиации на автоколебательные процессы

Ученые из ИМБП совместно с учеными из НИИЯФ МГУ исследовали особенности воздействия на реакцию Б-Ж пучков заряженных частиц с высокой величиной линейной передачи энергии [6, 7]. Такой фактор, в частности, встречается в космическом пространстве.

Для облучения образцов был использован пучок альфа-частиц из 120-см циклотрона НИИЯФ МГУ. В качестве катализатора вместо соединений Ce^{4+} был использован ферроин – комплекс Fe(II) с фенантролином (phen). Выбор этого катализатора объяснялся тем, что ферроин имеет ярко выраженную синюю окраску, меняющуюся на красную при переходе $\text{Fe(II)} \rightarrow \text{Fe(III)}$, что позволяло визуализировать динамику процесса.

Общая схема установки приведена на рис. 2. Пучок альфа-частиц из циклотрона (1) проходил по ионопроводу (4) через квадрупольные линзы (2), отклоняющий магнит (3), защитную стену (5), и далее через систему диафрагм (7) и вакуумный клапан (6) выходил из окна (8) ионопровода на воздух и попадал на рабочую кювету или капилляр (10). В качестве окна на фланце ионопровода использовалась алюминиевая фольга толщиной 50 мкм. В ряде экспериментов пучок коллимировали дополнительной сменной диафрагмой (9). Эта диафрагма крепилась на шток, перемещаемый микродвигателем, что позволяло дистанционно управлять вводом и выводом диафрагмы.

Рис. 2. Схема установки: 1 – циклотрон, 2 – квадрупольные линзы, 3 – отклоняющий магнит, 4 – ионопровод, 5 – защитная стена, 6 – вакуумный клапан, 7 – диафрагмы, 8 – окно ионопровода, 9 – сменная диафрагма, 10 – рабочая кювета или капилляр, 11 – веб-камера.,

Видеосъемка изучаемого процесса осуществлялась при помощи веб-камеры Philips (11) и компьютера, который подключался к ней с помощью трех последовательно соединенных USB-репиторов общей длиной 15 м. Результаты съемки записывались на жесткий диск компьютера в режиме on-line. Затем в режиме off-лайн при помощи программы «захват цвета» цвет в анализируемых точках разлагался на RGB-составляющие. Полученные результаты использовались для количественного анализа автоволновых процессов.

В этих исследованиях впервые было обнаружено возникновение ведущих центров в колебательной реакции типа Б-Ж под воздействием коллимированного излучения с высоким значением линейной передачи энергии. Наблюдалось также полное гашение автоволновых процессов под воздействием тотального облучения реакционного объема. Обнаруженные явления помимо их фундаментального значения могут быть использованы для моделирования процессов радиационного поражения живых систем под воздействием излучения подобного типа.

В следующих подобных исследованиях оценены величины пороговых значений поглощенной дозы для возникновения и полного гашения автоволн, а также впервые предложена модифицированная модель радикалатора, описывающая автоколебания под воздействием ионизирующего излучения. Показано, что эта модель позволяет получать концентрационные зависимости компонентов системы от времени, скорости инициированных и спонтанных волн в реакции БЖ в согласии с экспериментом.

Исследование влияния ГМУ на протекание реакции Белоусова-Жаботинского

В литературе описано немного примеров влияния слабых магнитных полей на автоколебания и автоволны.

В частности, исследовалась зависимость амплитуды автоколебаний от частоты и напряженности магнитного поля [8].

Был установлен факт влияния МП на автоколебательную реакцию Б.-Ж. Показано, что при действии слабых постоянных и переменных магнитных полей изменяются амплитуда колебаний и флуктуации амплитуды.

11 октября 2016 года мы присутствовали в НИИЯФ МГУ при проведении реакции Б.-Ж. и исследовании влияния ГМУ на эту реакцию.

В ходе эксперимента после смешивания нужных реактивов реагирующая смесь размещалась тонким плоским слоем в небольшой кювете. В присутствии катализатора возникали хорошо видимые невооруженным глазом автоволны. Кювета помещалась в трехкомпонентную систему катушек Гельмгольца диаметром 90 см.

Видеосъемка изучаемого процесса осуществлялась при помощи веб-камеры и компьютера, на жесткий диск которого записывались результаты съемки.

Рис. 3. Фотография экспериментальной установки по изучению влияния ГМУ на автоволновой процесс

Сотрудниками МГУ было предложено нашей группе самостоятельно обработать результаты эксперимента и попробовать сделать выводы. Для обработки результатов мы использовали программу Capture. Цвет в анализируемой точке разлагался на RGB-составляющие.

Рис. 4. Начало эксперимента ($t=150$ с)

Во время проведения опыта изменялись условия его проведения, а именно:
 $t = 0-152$ с – гипомангнитные условия (ГМУ)
 $t = 153 - 640$ с – обычное магнитное поле
 $t = 641 - 740$ с – режим юстировки катушек Гельмгольца
 $t = 741$ - до конца съемки – гипомангнитные условия.

Рис. 5. Продолжение эксперимента ($t=740$ с)

Для построения и изучения графиков зависимости амплитуды колебаний от времени мы выбрали результаты изменения со временем насыщенности синего цвета в точке регистрации волны (при наличии ферроина в качестве индикатора основными являются синий и малиновый цвета). Рассматривая колебания насыщенности синей составляющей, можно делать выводы о значениях периодов и амплитуд происходивших в реагирующей смеси автоколебаний. На первом графике зависимость амплитуды от времени представлена для 37 полных колебаний. Мы рассчитали среднее значение амплитуды 9-ого – 14-ого колебаний при обычных условиях и среднее значение амплитуды 18-ого – 23-его колебаний при ГМУ. Получилось, что после создания ГМУ среднее значение амплитуды колебаний увеличилось примерно в 1,3 раза.

График 1. Зависимость амплитуды 37 полных колебаний от времени

На втором графике зависимость амплитуды от времени представлена для первых 11 колебаний.

Время двух первых колебаний (при ГМУ) составило примерно 100 с ($T \approx 50$ с), а время двух следующих колебаний (в обычных условиях) примерно 86 с ($T \approx 43$ с).

График 2. Зависимость амплитуды первых 11 полных колебаний от времени

На третьем графике представлена зависимость амплитуды от времени для 12-ого – 22-ого колебаний.

$$T_{12-14} = (640 - 515):3 \approx 41,7 \text{ с}$$

$$T_{18-20} = (890 - 760):3 \approx 43,3 \text{ с}$$

Средняя амплитуда 18-ого – 20-ого колебаний (при ГМУ) больше средней амплитуды 12-ого – 14-ого колебаний (при обычных условиях) примерно в 1,27 раза.

График 3. Зависимость амплитуды 12 - 22 колебаний от времени

Заключение

В ходе проделанной работы нами сделаны следующие выводы:

1. В работах сотрудников НИИЯФ МГУ доказано воздействие ионизирующего излучения с высокой величиной ЛПЭ на процесс возникновения и гашения автоволн в реакции Белоусова-Жаботинского.

2. Доказано, что при воздействии ГМУ изменяются значения периода и амплитуды колебаний насыщенности цвета в выбранной точке в ходе реакции Белоусова-Жаботинского.

Так как реакция Белоусова-Жаботинского имеет прямые аналогии с процессами, происходящими в живых организмах, мы считаем целесообразным провести одновременные комплексные исследования влияния ГМУ на реакцию Белоусова - Жаботинского совместно с исследованием этого влияния на физиологические показатели человека (ЭЭГ, ЭКГ).

Исследование воздействия негативных космических факторов на организм человека является важной, а самое главное актуальной задачей современной науки, так как такое исследование будет иметь огромное прикладное значение и для космонавтики, и для земной магнитобиологии.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИИЯФ МГУ В. М. Лебедеву, А. В. Спасскому и А. Б. Приселковой за сопровождение экспериментальной части работы и проведенные консультации.

1. Б. П. Белоусов. Периодически действующая реакция и ее механизм. М.: «Химия и жизнь», № 7, 1982 г.
2. С. Э. Шноль, Б. Р. Смирнов, Г. И. Задонский, А. Б. Ровинский. Равнодушное перо рецензента. М.: «Химия и жизнь», № 7, 1982 г.
3. А. М. Жаботинский. Периодический ход окисления малоновой кислоты в растворе (Исследование реакции Белоусова). - Биофизика, 1964, т. 9, вып. 3, с. 306-311.
4. А. М. Жаботинский. Концентрационные колебания. М.: «Наука», 1974 г., с. 179.
5. Иваницкий Г. Р., Кринский В. И., Сельков Е. Е. - Математическая биофизика клетки, изд. Наука, 1978.
6. А. В. Спасский, К.А. Труханов, А. Б. Приселкова, В. М. Лебедев. Автоколебания и автоволны в химических системах при воздействии экстремальных условий. Третий съезд биофизиков России, 24-29 июня 2004 г., Воронеж. Тезисы докладов. Том II. с. 318.
7. Лебедев В. М., Приселкова А. Б., Спасский А. В., Труханов К. А. // Перспективные материалы. 2006. № 4. С. 11; // <http://dbserv.sinp.msu.ru:8080/sinp/files/pp-797.pdf>
8. Л. П. Агулова Влияние слабых магнитных полей на агглютинацию брюшнотифозных бактерии (in vitro) и автоколебательную химическую реакцию Белоусова – Жаботинского. Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. УДК 576.8.097.34:538.669, Томск – 1985 год.