

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ПОДВИЖНОСТИ ПЛАЗМОДИЯ *Physarum polycephalum*

Т. И. Авсиевич, С. Г. Проскурин

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов,

Рецензент д-р техн. наук, профессор С. И. Дворецкий

Ключевые слова и фразы: автоколебания; амебоидное движение; математическое моделирование; плазмодий *Physarum polycephalum*; спектральный анализ.

Аннотация: Автоколебания, которые являются наиболее существенным признаком биологической подвижности и характерны для большого класса биологических и физических явлений, исследованы на плазмодии *Physarum polycephalum*. Проведен спектральный анализ зависимости скорости движения протоплазмы от времени в центре тяжа плазмодия. Данный подход позволил выявить две четко выраженные гармонические составляющие в исходной зависимости, свидетельствующие о наличии двух гармонических составляющих источников движения. Построенная на основе спектрального анализа математическая модель, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Проблемой описания поведения автоколебательных систем занимаются исследователи разных научных направлений от математиков до биологов и химиков. Исследование и осмысление самоподдерживающихся нелинейных волн в активных средах дает представление о фундаментальных свойствах окружающего мира. Примерами могут служить реакция Белоусова–Жаботинского, механизмы сокращения в сердечной мышце, распространения нервных импульсов и др. [1 – 3].

Автоколебательные процессы – наиболее существенный признак биологической подвижности. Таким образом, амебоидная подвижность является характерным примером автоколебательной подвижности. Одним из организмов с ярко выраженным амебоидным типом движения является плазмодий *Physarum polycephalum*. Это многоядерная клетка, подвижность протоплазмы в которой представлена фонтанирующим ведущим полюсом

Авсиевич Татьяна Игоревна – аспирант, инженер кафедры «Биомедицинская техника», e-mail: tavsievich@tamb.ru; Проскурин Сергей Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника», ТамбГТУ, г. Тамбов.

протоплазмы и распространяющейся за ним сетью разветвленных трубочек диаметром 200 мкм (тяжей), напоминающих кровеносные сосуды, каждая из которых состоит из малоподвижной гелеобразной эктоплазмы, содержащей в центре жидкую эндоплазму [4]. Для этого организма свойственны постоянные пульсации, обусловленные сократительной активностью актин-миозиновых комплексов, построение и разрушение которых приводит к движению миксомицета, аналогично механизмам движения мышц. Организм имеет способность к адаптивному поведению, в зависимости от условий его окружения, и, таким образом, является простейшей физической моделью для исследования механизма автоколебательных систем. Следовательно, свойства и закономерности, выявленные для движения миксомицета, могут распространяться и на другие процессы, трудно поддающиеся изучению. Удобство исследования протоплазмы миксомицета заключается в возможности исследования его *in vivo*. Простые задающие биохимические осцилляторы, ответственные за автоколебательную активность плазмодия, рассредоточены по всему организму *Physarum polycephalum*, однако их число и механизмы взаимосвязи, благодаря которым формируется общий ответ организма, при отсутствии централизованной системы ответной реакции организма, остаются неизвестными [5, 6].

При помощи метода лазерной доплеровской микроскопии впервые измерена знакопеременная временная зависимость скорости движения протоплазмы миксомицета, соответствующая колебаниям сократительной активности тяжа плазмодия. Принцип работы анемометра [7] основан на регистрации доплеровского сдвига несущей частоты рассеянного сигнала, который зависит от направления и скорости ее движения. Таким образом, регистрируется знакопеременная временная зависимость скорости движения протоплазмы, соответствующая автоколебательной подвижности и сократительной активности тяжа плазмодия.

В работе анализируется спектр временной зависимости скорости автоколебательной подвижности протоплазмы изолированного тяжа плазмодия. Эксперимент проводился при температуре 25 °С. Тяж плазмодия длиной 2 см вместе с питательной подложкой из агар-агара вырезался из целого организма и горизонтально размещался в измерительной кювете. В кювету добавляли буферный раствор солей с содержанием, ммоль: CaCl_2 – 1; NaCl – 2; KCl – 2; MgCl_2 – 3. Колебания возобновлялись в отрезке через 10...15 мин, после чего производилась их регистрация в течение 10 мин.

Результаты измерений приведены на рис. 1, где представлена временная зависимость скорости движения протоплазмы v в буферном растворе солей. Полученная временная зависимость была проанализирована при помощи спектрального (Фурье) анализа в математическом пакете MATLAB.

Таким образом, выявлено наличие двух явно выраженных пиков в спектре частот (рис. 2), что означает присутствие в исходном сигнале как минимум двух гармонических составляющих. Максимальные частоты, соответствующие гармоническим вкладам в основной сигнал, определялись по пикам гауссианов, с помощью которых описаны частотные зависимости.

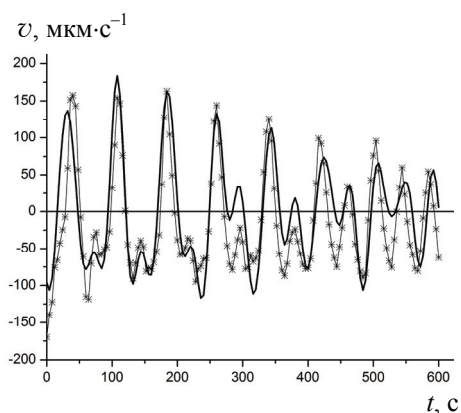


Рис. 1. Временная зависимость движения протоплазмы плазмодия в буферном растворе солей
 * — экспериментальный результат;
 — — результат моделирования, сумма гармонических сигналов

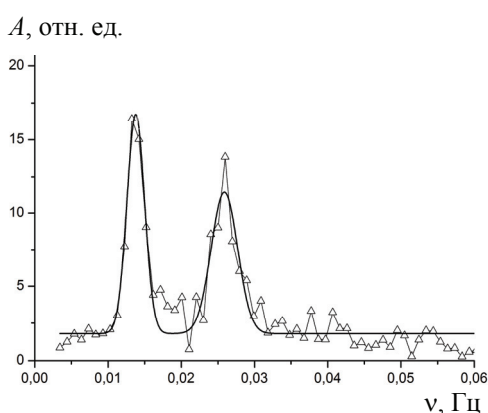


Рис. 2. Спектр исходного сигнала профиля скорости протоплазмы в центре тяжа плазмодия:
 Δ — результат спектрального анализа;
 — — описание распределением Гаусса

Определенные значения частот гармоник сигнала составили соответственно $\nu_1 = 0,013 \pm 0,0004$ и $\nu_2 = 0,0254 \pm 0,0001$ Гц. С учетом найденных значений частот в исходном сигнале, построен модельный сигнал автоколебаний плазмодия, представленный суммой простых гармонических колебаний с разными частотами, амплитудами и фазами, выделенными в сигнале, описываемый уравнением (см. рис. 1)

$$V(t) = A_1(t)e^{i(\nu_1 t + \varphi_1)} + A_2(t)e^{i(\nu_2 t + \varphi_2)}, \quad (1)$$

где $A_{1,2}$ — амплитуды гармоник; t — время, с; i — мнимая единица; $\nu_{1,2}$ — соответствующие частоты; $\varphi_{1,2}$ — фазы гармоник.

Критерий Пирсона χ^2 показывает, что на уровне значимости 0,001 имеет место значимая корреляция между теоретическими и экспериментальными данными ($R^2 = 0,843$).

Таким образом, регистрация скорости осцилляций протоплазмы отдельного тяжа позволяет выделить две четких гармонических составляющих, различить которые в целой клетке плазмодия не представлялось возможным. Применение спектрального анализа позволяет количественно определить величины и соотношение частот автоколебательной подвижности протоплазмы плазмодия ($\nu_2/\nu_1 \approx 2$). В дальнейшем предполагается провести анализ изменений частот во времени и их оценку при остановке двигательной активности плазмодия.

Список литературы

1. Елькин, Ю. Е. Автоволновые процессы / Ю. Е. Елькин // Мат. биология и биоинформатика. — 2006. — Т. 1, № 1. — С. 27 — 40.
2. Васильев, В. А. Автоволновые процессы / В. А. Васильев, Ю. М. Романовский, В. Г. Яхно. — М.: Наука, 1987. — 240 с.
3. Иваницкий, Г. Р. От динамики популяционных автоволн, формируемых живыми клетками, к нейроинформатике / Г. Р. Иваницкий, А. Б. Медвинский, М. А. Цыганов // Успехи физических наук. — 1994. — Т. 164, № 10. — С. 1041 — 1072.

4. Романовский, Ю. М. Физические основы клеточного движения. Механизмы самоорганизации амебодной подвижности / Ю. М. Романовский, В. А. Теплов // *Успехи физических наук*. – 1995. – Т. 165, № 5. – С. 555 – 578.

5. Takamatsu, A. Spontaneous Switching among Multiple Spatio-Temporal Patterns in Three-Oscillator Systems Constructed with Oscillatory Cells of True Slime Mold / A. Takamatsu // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 2006. – Vol. 223, Issue 2. – P. 180 – 188.

6. A Fluid-Filled Soft Robot that Exhibits Spontaneous Switching among Versatile Spatiotemporal Oscillatory Patterns Inspired by the True Slime Mold / T. Umedachi [et al.] // *Artificial Life*. – 2013. – Vol. 19, № 1. – P. 67 – 78.

7. Проскурин, С. Г. Доплеровская микроскопия знакопеременных нестационарных потоков в живых объектах : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 03.00.02 / Проскурин Сергей Геннадьевич. – М., 1993. – 120 с.

References

1. El'kin Yu.E. *Mathematical Biology and Bioinformatics*, 2006. vol. 1, no. 1, pp. 27-40.

2. Vasil'ev V.A., Romanovskii Yu.M., Yakhno V.G. *Avtovolnovye protsessy* (Autowave processes), M.: Nauka, 1987, 240 p.

3. Ivanitskii G.R, Medvinskii A.B, Tsyganov M.A. *Physics-Uspekhi*, 1994, vol. 37, no. 10, pp. 961-989.

4. Romanovskii Yu.M., Teplov V.A. *Physics-Uspekhi*, 1995, vol. 38, no. 5, pp. 521-542.

5. Takamatsu A. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2006, vol. 223, issue 2, pp. 180-188.

6. Umedachi T., Idei R., Ito K., Ishiguro A. *Artificial Life*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 67-78.

7. Proskurin S.G. *PhD Dissertation (Physical and Mathematical Sciences)*, M., MGU, 1993, 120 p.

Spectral Analysis of Self-Oscillating Mobility of Plasmodium *Physarum polycephalum*

T. I. Avsievich, S. G. Proskurin

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: amoeboid motility; mathematical modeling; plasmodium *Physarum polycephalum*; self-oscillations; spectral analysis.

Abstract: Self-oscillations, which are the most essential attributes of biological motility and are typical of a large class of biological and physical phenomena, were investigated for plasmodium *Physarum polycephalum*. Spectral analysis of the time-dependent velocity of protoplasm in the center of a strand was carried out. This approach allows identifying two distinct harmonic components in the original signal, indicating the presence in slime mold at least two sources of motion. Based on spectral analysis the mathematical model is in a good agreement with experimental data.

© Т. И. Авсиевич, С. Г. Проскурин, 2014

Статья поступила в редакцию 02.11.2014 г.