

О текущем состоянии исследований бифуркационной памяти в математической физике биологических объектов

Москаленко А. В.¹

ИМПБ РАН — филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
<http://a-v-m.pro/>

Bifurcation memory in mathematical physics of biological objects: the current state of research

Moskalenko A. V.

IMPB RAS — Branch of KIAM RAS

“Bifurcation memory” (BM) is a generalized name for some specific features of behavior of the dynamical system near the bifurcation. The essence of the behavior lies in the appearance of a special type of transition process. A review of the results achieved in researches of the BM and a discussion of prospects such researches are given.

1 Определение понятия

Под термином «**бифуркационная память**» (БМ) принято понимать необычный переходный процесс, иногда наблюдаемый в поведении системы, находящейся вблизи бифуркационной границы, а именно в области «бифуркационного пятна» (bifurcation spot) [1–3].

2 Вводные замечания о текущем состоянии исследований биологических объектов с использованием методов физики

Дистанция между такими научными подразделениями как «*физика биологических объектов*» (напр. «кардиофизика») и «*физика в биологической науке*» (напр. «биофизика сердца») постепенно и неотвратимо сокращается, однако в настоящее время остаётся ещё весьма заметной. Первое из названного подразумевает научное рассмотрение биологических объектов в рамках парадигмы, принятой в физике; второе же следует понимать в узком смысле как набор инструментальных методов, заимствованных из физики и используемых в рамках парадигмы, сложившейся в биологической науке.

2 Обзор результатов, достигнутых в исследованиях бифуркационной памяти

С учётом вышесказанного, следует признать, что явления бифуркационной памяти в настоящее время продолжают в большей мере оставаться скорее предметом математической физики вообще, — и математической физики биологических объектов, в частности, — однако представителями биофизики они поняты и восприняты всё ещё весьма слабо.

Отчасти такое состояние дел обусловлено тем обстоятельством, что экспериментальное подтверж-

дение существования БМ в биологических объектах пока удалось достоверно получить лишь в одной работе [2], достаточно свежей.

Вместе с тем в рамках кардиофизики недавно был дан ряд относящихся к БМ предсказаний, которые достаточно очевидным образом следуют из анализа математических моделей, но пока ещё не были подтверждены в натурном эксперименте: 1) существование «серпантинных аритмий» [4], 2) особые формы потенциала действия при пейсмекерной активности [5], 3) бифуркационный механизм триггерной активности [6]. Эти результаты теоретических исследований ждут своей экспериментальной верификации.

Напомним также и о том обстоятельстве, что основные результаты в исследованиях БМ были получены при рассмотрении проблем обеспечения безопасности на транспорте [1], причём было показано, что транспортное средство, оказавшись в зоне БП, теряет управляемость.

С другой стороны, для биологической системы (а именно, для системы свёртывания крови) было показано [2], что её пребывание как раз в области БМ и соответствует нормальному поведению этой системы, а любое отклонения этой системы от области БМ приводит к гибели биологический организм в целом.

3 Обзор перспектив исследований бифуркационной памяти

3.1 Значение пребывания в области бифуркационного пятна для систем технических и для систем биологических

Обобщая приведённые выше скудные результаты, можно отметить принципиальное различие в роли БМ для технических систем и для систем биологических, — однако остаётся открытым

вопрос о том, насколько далеко возможно распространить такие выводы. В отношении систем технических ситуация представляется более ясной, поскольку эти системы вполне намеренно создаются людьми именно таким образом, чтобы они в своём рабочем режиме находились вдали от бифуркационных границ. Однако насколько характерным является для биологических систем их пребывание внутри бифуркационного пятна, — ответ на этот вопрос требует проведения широкомасштабных исследований.

Проведения отдельной исследовательской работы требуют проблемы обеспечения безопасности на транспорте с учётом влияния БМ на управляемость транспортных средств.

С практической точки зрения, в обоих случаях важно развивать методы точного количественного анализа БМ с целью выяснения ширины пограничной зоны, в которой существует феномен БМ, т.е. с целью выяснения точного расположения «бифуркационного пятна», и некоторые подходы к решению этой задачи были предложены ранее [7].

2.2 Бифуркационная память в системах реакционно-диффузионного типа

Уже многие десятилетия предметом пристального внимания исследователей являются системы реакционно-диффузионного типа (СРДТ), что обусловлено их широкой распространённостью среди природных объектов, которые принято относить к *активным средам*. Именно в СРДТ был открыт широкий класс процессов, получивших название «автоволновые процессы» [8]. Наиболее распространённым в настоящее время применением СРДТ можно признать моделирование миокарда, что связано с исследованиями автоволновых процессов в сердце; наиболее свежие обзоры таких исследований даны в [4, 6]. В одной из таких моделей миокарда, а именно в модели Алиева-Панфилова [9], были обнаружены феномены БМ [3].

Свойственны ли феномены БМ всем СРДТ или же являются особенностью самой модели Алиева-Панфилова, которая обладает существенной нелинейностью, остаётся под вопросом, — и очевидно, что ответ на этот вопрос имеет для математики фундаментальное значение. В связи с указанными обстоятельствами, актуальным представляется поиск феноменов БМ в таких, казалось бы, уже хорошо изученных моделях, как система ФитцХью-Нагумо [10]. Вместе с тем, поиск БМ в широко используемых моделях миокарда также весьма актуален, поскольку эти модели широко применяются для нужд клинической медицины.

2.3 Экспериментальное подтверждение бифуркационной памяти

Верификация БМ в реальном естественнонаучном эксперименте сопряжена с определёнными трудностями, вызванными тем, что реальные объекты обычно являются неоднородными (гетерогенными и анизотропными), — что маскирует либо искажает феномены БМ.

Химическая реакция Белоусова-Жаботинского, являясь классическим и наиболее полно изученным вариантом СРДТ в реальном мире, представляется весьма пригодной для проведения такой верификации, т.к. она позволяет воспроизводить условия однородной активной среды, и для неё был разработан ряд математических моделей, наиболее точная из которых получила название «Пушинатор» [11]. Если более полное исследование модели «Пушинатор» выявит области пространства параметров этой модели, соответствующие положению «бифуркационного пятна», это поспособствует успеху соответствующих натуральных экспериментов.

Список литературы

- [1] M. Feigin, M. Kagan. Emergencies as a manifestation of effect of bifurcation memory in controlled unstable systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2004; **14**(7): 2439–2447.
- [2] Ф.И. Атауллаханов, Е.С. Лобанова, О.Л. с соавт. Сложные режимы распространения возбуждения и самоорганизации в модели свертывания крови. *УФН*, 2007. **177**(1): 87–104.
- [3] A. Moskalenko, Yu. Elkin. The lacet: a new type of the spiral wave behavior. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2009; **40**(1):426–431.
- [4] A. Moskalenko. Tachycardia as “Shadow Play”. In: *Tachycardia*. Croatia: InTech, 2012.
- [5] А.В. Москаленко. Причины пейсмекерной активности с точки зрения биосинергетики. В: *Математическая биология и биоинформатика. Доклады V Международная конференция*. Пушино, 2014.
- [6] A. Moskalenko. Basic Mechanisms of Cardiac Arrhythmias. In: *Cardiac Arrhythmias — Mechanisms, Pathophysiology, & Treatment*. Croatia: InTech, 2014.
- [7] А.В. Москаленко. О необходимости количественного анализа спонтанного дрейфа автоволнового вихря в 2D-среде. В: *Математическая биология и биоинформатика. Доклады III Международная конференция*. Пушино, 2010.
- [8] Автоволновые процессы в системах с диффузией. Сборник научных трудов. Горький: Институт прикладной физики АН СССР 1981.
- [9] R. Aliev, A. Panfilov. A simple two-variable model of cardiac excitation. *Chaos, Solutions & Fractals* 1996; **7**(3): 293–301.
- [10] A.T. Winfree. Varieties of spiral wave behavior: An experimentalist's approach to the theory of excitable media. *Chaos*, 1991; **1**(3), 303–334.
- [11] R.R. Aliev, A.B. Rovinsky. Spiral waves in the homogeneous and inhomogeneous Belousov-Zhabotinsky reaction. *J. Phys. Chem.* 1992; **96**: 732-736.

ⁱ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, гранты 16-01-00692 и 14-07-00419.