



**Отзыв официального оппонента на диссертацию  
Слепухиной Евдокии Сергеевны**

«Математическое моделирование и анализ стохастических феноменов нейронной динамики»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Слепухиной Евдокии Сергеевны посвящена систематическому исследованию влияния шума на динамику моделей нейронной активности, выявлению и анализу механизмов возникновения различных индуцированных шумом явлений.

Диссертацию можно отнести к математической нейронауке (mathematical neuroscience), которая является активно развивающейся областью на стыке нескольких современных направлений: нейрофизиологии и нейронауки, биофизики клетки, нелинейной динамики и теории динамических систем. Многие нейрофизиологические процессы и типы активности нервной клетки получили интерпретацию в терминах теории динамических систем. Детерминированные механизмы нейронной активности хорошо изучены. В настоящее время одним из актуальных направлений в области математического моделирования нейродинамики является изучение стохастических моделей. Воздействию шума подвержены любые реальные системы, и изучение факторов его влияния крайне важно во многих научных направлениях и сферах практической деятельности. Известно, что в нелинейных системах случайные флуктуации могут приводить ко многим неожиданным эффектам и принципиально новым динамическим режимам, отсутствующим в системах без шума. Такие явления наблюдаются, в частности, в стохастических нейронных моделях. Среди них: стохастическая возбудимость, индуцированные шумом переходы, стохастический резонанс, когерентный резонанс, стохастическая синхронизация, вызванная шумом хаотизация. Модели нейронной активности относятся к классу быстро-медленных систем, для которых математическая теория случайных возмущений находится в стадии становления. Так как строгие аналитические результаты для таких систем затруднены, а зачастую невозможны, одной из важных задач является разработка эффективных численных и приближенных методов анализа вероятностных механизмов возникновения стохастических режимов и явлений в нейронных моделях, и создание соответствующих пакетов программ.

В диссертации Слепухиной Е.С. проведено систематическое исследование различных явлений, связанных с шумом, в нескольких моделях нейронной активности с применением новых разработанных автором методов анализа. Для решения поставленных в диссертационной работе задач созданы четыре программных комплекса.

Диссертационная работа Слепухиной Е.С. состоит из введения, шести глав основного содержания, заключения и списка цитируемой литературы.

Первая глава посвящена методам вероятностного анализа стохастических систем. В ней описывается техника функции стохастической чувствительности и доверительных областей. Этот подход был разработан в группе профессора Л.Б. Ряшко. Автор диссертации разработала численную реализацию метода и алгоритмы анализа стохастических явлений в моделях нейронной активности. Достоинством предложенных автором методов является универсальный для широкого класса моделей подход, учитывающий геометрические особенности структуры фазового пространства системы вблизи аттракторов и их стохастическую чувствительность.

В следующих четырех главах автор применяет разработанные методы для исследования разнообразных эффектов шума в четырех моделях нейронной активности — двумерной системы Моррис-Лекара (глава 2), двумерной (глава 3) и трехмерной (глава 4) модели Хиндмарш-Роуз и двумерной модели ФитцХью-Нагумо (глава 5). Такой выбор автор обуславливает наличием в этих системах определенных типов режимов и их бифуркаций. Этот выбор вполне оправдан, так как позволяет охватить широкий спектр нелинейной динамики используя сравнительно простые модели, что придает результатам универсальный и фундаментальный характер.

В шестой главе приводится описание функциональных возможностей комплексов программ, разработанных автором для исследования стохастических моделей нейронной активности.

Среди новых и интересных результатов отмечу следующие.

- Стохастическая генерация квазипериодических колебаний (торов), приводящая к переходу в режим пачек (бёрстинга) из режима периодических спайков или состояния покоя, в трёхмерной модели Хиндмарш-Роуз.
- Эффект расщепления стохастических циклов в модели ФитцХью-Нагумо.
- Исследование различных вариантов переходов между порядком и хаосом в двумерной модели Хиндмарш-Роуз.

По крайней мере первые два результата, на мой взгляд, заслуживают быть включенными в основные положения, выносимые на защиту.

Достоинством данной работы является широкий спектр исследуемых явлений и систематический подход, позволяющий установить фундаментальную связь между типами бифуркаций и динамических режимов в детерминированных системах и индуцированными шумом эффектами, которые интерпретируются как стохастические бифуркации. Автор удачно сочетает метод функции стохастической чувствительности и прямое численное моделирование систем, показывая хорошее соответствие между результатами, что указывает на эффективность разработанных методов и подтверждает достоверность результатов. Без сомнения, диссертация представляет законченное исследование актуальной научной проблемы.

Как по любому интересному и содержательному исследованию, по данной диссертационной работе можно сформулировать критические замечания.

1. Во Введении имеется ряд неточностей. Уравнение ФПК является лишь приближением даже для марковских процессов. Далее, для определения корреляционных свойств стационарных диффузионных процессов необходимо решение нестационарного (двухчастичного) уравнения ФПК. Утверждение, что стационарная плотность вероятности может быть аналитически получена только для одномерных систем — неточно. Для класса так называемых потенциальных многомерных систем стационарная плотность вероятности может быть легко найдена. Например, для трехмерного броуновского движения в потенциале, плотность вероятности хорошо известна и является распределением Больцмана.

2. Автор исследует влияние только одного типа шума: диффузионный белый Гауссов шум. Это, конечно, является приближением. Шум в реальных нейронах может быть не гауссовым и обладает ограниченной спектральной плотностью мощности. В диссертации отсутствует аргументация в пользу использования приближения белого гауссова шума. Несомненно, методы предложенные в работе, могут быть распространены на цветной шум, например, путем введения дополнительных переменных, моделирующих шум.

3. В диссертации в основном исследуется влияние аддитивного шума на системы. Воздействие параметрического шума рассматривается только в Главе 2, посвященной модели Моррис-Лекара. Введение такого шума в уравнение для напряжения несколько формально. Более интересным представляется исследование влияния мультипликативного шума во втором уравнении модели, которое описывает вероятность открытия калиевых ионных каналов: мультипликативный шум описывает флуктуации за счет конечного числа ионных каналов.

4. В этой связи возникает вопрос о распространении методов, развиваемых в диссертации, на исследование стохастической динамики в моделях типа Ходжкина-Хаксли. В частности, сравнительное исследование эффектов аддитивного шума в уравнении для напряжения и мультипликативного шума в уравнениях для кинетики ионных каналов методами, предложенными в диссертации, представляется интересной и важной задачей для дальнейших исследований.

5. В работе не детализированы методы численного моделирования и не указаны параметры вычисления статистических мер динамических режимов (длины реализации, количество спайков, параметры вычисления Ляпуновских показателей).

Указанные замечания носят скорее характер рекомендаций и не меняют общего положительного впечатления от диссертационной работы. Диссертация Слепухиной Е.С. выполнена на высоком уровне и является серьезным законченным научным исследованием, посвященным актуальной проблеме, имеет высокую теоретическую и практическую значимость. В этой связи хочу отметить, что публикации автора использовались мной при чтении курса для аспирантов «Теоретические и вычислительные методы в биофизике» в Университете Огайо. Результаты диссертационной работы являются новыми и интересными, обоснованы и достоверны. Работа написана хорошим научным языком, имеется большое число литературных ссылок по каждой из решаемых задач. Диссертация хорошо иллюстрирована. Личный вклад и публикации автора описаны четко и однозначно.

Основные результаты диссертации широко и полно отражены в публикациях автора (всего 33, из них 11 — статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК и входящих в системы цитирования WoS, Scopus, РИНЦ, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ), а также были представлены на научных конференциях разного уровня.

Тема и содержание работы соответствуют паспорту специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Автореферат и опубликованные работы точно отражают содержание работы.

Считаю, что диссертация Слепухиной Евдокии Сергеевны полностью удовлетворяет всем требованиям пп. 9-14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук,  
профессор Факультета физики и астрономии  
Университета Огайо (США)  
Тел.: +1-740-593-1701  
E-mail: neimana@ohio.edu  
Department of Physics & Astronomy  
Ohio University  
Athens Ohio 45701, USA

Нейман Александр Борисович

«14» мая 2018 г.

I confirm the signature of Prof. A. B. Neiman

Wayne Chaisson  
Department Administrator  
Department of Physics and Astronomy  
Ohio University  
Athens Ohio 45701, USA  
E-mail: [chaisson@ohio.edu](mailto:chaisson@ohio.edu)  
Phone: +1 740-593-1712