

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Масленникова Олега Владимировича «Коллективная динамика и функциональные свойства обучаемых нелинейных сетей активных элементов», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика

Диссертационная работа О. В. Масленникова посвящена одному из самых интересных направлений на стыке радиофизики, нелинейной динамики и теории нейронных сетей — выяснению того, как сети связанных активных элементов приобретают функциональные свойства: способность воспроизводить заданные паттерны активности, различать входные стимулы, накапливать и удерживать информацию, переключаться между несколькими режимами работы. Постановка задачи в такой формулировке закономерно выводит работу за рамки одной специальности и делает её содержательной для тех, кто занимается экспериментальным и теоретическим исследованием реальных нейронных систем.

Сквозной мыслью работы, как это видно из автореферата, является представление об обучении как об управляемом формировании коллективной динамики — создании в сети аттракторов, переходных маршрутов и метастабильных состояний, обеспечивающих требуемое поведение. Такой взгляд представляется содержательным и плодотворным: он переводит обсуждение работы обучаемых сетей с языка качественных метафор на язык конкретных динамических объектов, к которым применимы привычные характеристики — устойчивость, бассейны притяжения, переходные времена, чувствительность к возмущениям. Тем самым работа отвечает актуальной задаче перехода от феноменологического описания работы нейросетевых моделей к выявлению лежащих в их основе закономерностей.

Структура автореферата позволяет проследить ясную линию рассуждения: от анализа отдельных активных элементов и их хаотических режимов к коллективной динамике в сетях с различной топологией связей, далее к сетям резервуарного типа с обучаемым выходом и, наконец, к полностью обучаемым рекуррентным сетям. Такое построение даёт возможность увидеть, как одни и те же базовые понятия — аттрактор, метастабильное состояние, переходный маршрут — работают на всех уровнях рассмотрения, связывая в одно целое задачи, традиционно относившиеся к разным научным направлениям.

Из конкретных результатов хотелось бы отметить несколько направлений, представляющих, на мой взгляд, особый интерес.

Во-первых, исследование адаптивной сети спайковых осцилляторов с событийной перестройкой топологии и введение гиперсетевого языка для описания переходов между метастабильными кластерными состояниями. Наблюдаемое в этой модели качественное различие между автономным режимом, в котором система случайным образом блуждает по множеству возможных кластерных конфигураций, и режимом со стимулом, при котором траектории сходятся к воспроизводимому стимул-специфичному циклу, представляет собой ясно сформулированное модельное проявление перехода от спонтанной к направленной активности. Это типологически близко тому, что в нейробиологии обсуждается как переход от спонтанных к воспроизводимым последовательностям нейронной активности, связанным с конкретным сенсорным или контекстуальным входом. Подтверждение этих результатов аппаратной реализацией на ПЛИС с временными масштабами, сопоставимыми с нейронными, придаёт им дополнительную убедительность.

Во-вторых, последовательное рассмотрение трёх качественно различных вычислительных режимов в обучаемых резервуарных сетях: автономной генерации целевого паттерна, дискриминации входных стимулов и переключения между несколькими целевыми последовательностями. Эти три режима соответствуют базовым операциям, традиционно

связываемым с работой реальных нейронных сетей мозга, — генерации внутренних последовательностей, селективному отклику на внешние сигналы и контекстно-зависимому переключению. Особо стоит отметить наблюдение, что для задачи дискриминации обучение не подавляет внутреннюю хаотическую динамику, а структурирует её, формируя стимул-индуцированные метастабильные маршруты, активируемые внешними воздействиями. Указание автора на то, что небольшой доли элементов с наибольшими выходными весами оказывается достаточно для воспроизведения целевого отклика, переключается с известными в нейронауке наблюдениями о функциональной специализации малых подпопуляций нейронов и заслуживает отдельного упоминания.

В-третьих, экспериментальная реализация физического резервуара на цепочке связанных возбудимых генераторов ФитцХью–Нагумо и применение разработанной методологии к реальным сигналам, включая акустические данные. Сочетание теоретического анализа, численного моделирования и аппаратной реализации делает работу законченным радиофизическим исследованием в полном смысле слова. Это особенно важно с учётом того, что значительная часть современных работ по обучаемым рекуррентным сетям выполняется исключительно вычислительными средствами; продемонстрированный аппаратный эквивалент обозначает практически реализуемый путь к нейроморфным вычислительным устройствам.

В-четвёртых, результаты четвёртой главы по полностью обучаемым рекуррентным сетям. Демонстрация того, что обучение задаче двухальтернативного выбора приводит к спонтанному формированию двух конкурирующих популяций элементов, реализующих принцип «победитель получает всё» и третьей, неспецифической группы, а обучение задаче интеграции непрерывной угловой координаты — к самоорганизации кольцевого аттрактора с характерным профилем связей «мексиканской шляпы», представляется существенно более широкой, чем чисто радиофизический результат. Эти архитектуры — конкурирующие популяции при принятии решений и кольцевой аттрактор при интеграции непрерывных переменных — независимо обнаружены в экспериментальных нейробиологических исследованиях, в том числе в работах по центральному комплексу мозга дрозофилы и по нейронам префронтальной коры приматов. Тот факт, что эти структуры спонтанно возникают в обучаемой сети, исключительно из требования решать соответствующую задачу, поддерживает общую гипотезу о существовании универсальных динамических принципов организации нейронных вычислений, не зависящих от конкретной физической реализации, и тем самым делает результаты работы интересными для нейронаучного сообщества.

Заслуживает внимания и сопоставление обучения с подкреплением и обучения с учителем на идентичных задачах. Наблюдение, что эти две парадигмы при сопоставимой точности приводят к качественно различным внутренним решениям — сбалансированным конкурирующим популяциям с гибридной аттракторной структурой в одном случае и существенно несбалансированным ансамблям с динамикой, сведённой к неподвижным точкам, в другом, — содержательно с методологической точки зрения. Оно показывает, что внешне эквивалентное поведение системы не означает её механистической эквивалентности, и ставит важные вопросы как при интерпретации экспериментальных данных в нейронауке, так и при оценке внутренней организации искусственных систем.

Совокупность представленных в автореферате результатов производит впечатление целостной программы, объединённой единой методологической рамкой и охватывающей последовательно усложняющиеся объекты — от отдельных активных элементов до полностью обучаемых рекуррентных сетей. Объём публикаций автора по теме диссертации в ведущих российских и международных журналах, широкая география докладов на профильных конференциях и тематика отдельных работ, опубликованных в журналах нейронаучного и междисциплинарного профиля, свидетельствуют о признании результатов в соответствующих научных сообществах.

Автореферат написан ясным языком, разделение на части и логические переходы между ними облегчают восприятие материала. Положения, выносимые на защиту, сформулированы конкретно и допускают независимую проверку.

Совокупность теоретических, численных и экспериментальных результатов, представленная в автореферате О. В. Масленникова, имеет существенное значение как для радиофизики и теории нелинейной динамики, так и для смежных областей — вычислительной нейронауки и теории обучаемых нейронных сетей. Содержание автореферата позволяет заключить, что диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 — радиофизика, а её автор, Олег Владимирович Масленников, заслуживает присуждения искомой учёной степени.

Анохин Константин Владимирович

профессор, д.м.н, академик РАН
специальность - нейробиология
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова
Директор Института перспективных исследований мозга
119192, Москва, Ломоносовский пр., 27, корпус 1
+7 (495) 938-25-48
contact@brain.msu.ru

Подпись К.В. Анохина заверяю:

заместитель директора Института перспективных исследований мозга МГУ
В.М. Егикова /

М.П.

29 мая 2026 г.

