

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ М. И. РАБИНОВИЧА И СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН

*И. С. Арансон*¹, *А. И. Малеханов*^{2*}, *В. И. Некоркин*², *А. С. Пиковский*³,
*Л. Ш. Цимринг*⁴, *А. Л. Фабрикант*⁵

¹ Pennsylvania State University, University Park, USA

² Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород, Россия

³ Potsdam University, Potsdam, Germany

⁴ University of California, San Diego, USA

⁵ KLA Corporation, Fremont, USA

Представлен краткий обзор научной тематики работ Михаила Израилевича Рабиновича, отражающий её основные направления в контексте колебательно-волновых исследований последних шести десятилетий.

Настоящий комментарий является данью памяти выдающего специалиста в области теории колебаний и волн члена-корреспондента РАН Михаила Израилевича Рабиновича, ушедшего из жизни 31 марта 2025 года. Представленный ниже краткий обзор научной биографии Михаила Израилевича не претендует на полноту, но отражает её основные вехи и связь с некоторыми из современных направлений колебательно-волновых исследований.

Начало научной биографии и первый крупный цикл работ М. И. Рабиновича (М. И.) связаны с развитием асимптотических методов анализа нелинейных процессов в распределённых системах [1, 2]. Ключевая идея М. И. представляла собой нетривиальное обобщение классического асимптотического метода Крылова—Боголюбова для сосредоточенных систем и состояла в представлении правых частей уравнений в виде ряда по неизвестным операторам, определяемым из условия минимума ошибки в каждом приближении (этот подход нашёл своё дальнейшее развитие в прикладной математике). Используя эти методы, он впервые сумел доказать существование устойчивых бегущих волн в диссипативных нелинейных средах [3]. Теоретическое предсказание М. И. было подтверждено затем экспериментально с использованием цепочки электромагнитных осцилляторов на основе туннельных диодов [4].

В середине 1970-х годов внимание М. И. привлекли маломодовые модели взаимодействия нелинейных волн в неравновесных средах. М. И. сформулировал модель распадного триплета, за основу которой он взял консервативную систему трёх взаимодействующих волн, удовлетворяющих условиям резонанса частот и волновых чисел, добавил инкремент в волну с наибольшей частотой и декременты в волны с низшими частотами. Оказалось, что в такой системе реализуется сложное неперiodическое поведение траекторий [5]. Как раз в эти годы физики открыли для себя возможность хаотического поведения в диссипативных динамических системах, и эта работа явилась одним из первых наблюдений маломерного динамического хаоса. М. И. распознал схожесть системы Лоренца с триплетом параметрически возбуждаемых волн и сформулировал модель, часто цитируемую затем как «система Рабиновича», хаотическая динамика в которой была впервые исследована в работе [6]. Сходная маломодовая модель хаотического насыщения модуляционной неустойчивости получила название «система Рабиновича—Фабриканта» [7]. Впоследствии она также приобрела популярность и инициировала многочисленные исследования

* almal@ipfran.ru

внутренней структуры обнаруженного в ней странного аттрактора [8]. Примерно в это же время М. И. выдвинул идею построения генератора хаотических автоколебаний в радиотехнической схеме с быстрыми и медленными движениями. Эта идея была реализована сначала численно и аналитически [9], а затем экспериментально (генератор Кияшко—Пиковского—Рабиновича) [10].

В цикле последующих работ усилия М. И. и его соавторов были сосредоточены не просто на демонстрации хаоса в различных динамических системах, но на выявлении общих свойств систем, проявляющих хаотическое поведение. Многомерный хаос в дискретных системах — распределённых цепочках связанных осцилляторов — исследовался в работах [11–14], развитие в которых методы анализа затем были применены для описания сложной динамики в непрерывных физических системах. В частности, были обнаружены и исследованы экспериментально пространственно-временной хаос в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби Фарадея [15] и сдвиговых течениях [16].

В результате работ М. И. и других исследователей того времени казавшиеся сначала абстрактными математические модели «странных аттракторов» стали широко использоваться для описания хаотического поведения реальных физических систем. Это привело к формированию новой парадигмы, связавшей сложное поведение систем с большим числом степеней свободы (например, гидродинамическую турбулентность) с динамическим хаосом. Важную роль в продвижении этих представлений сыграли обзор М. И. [17] и затем написанная им глава «Турбулентность» для 3-го издания тома 6 («Гидродинамика») курса теоретической физики Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [18].

С середины 1980-х годов М. И. увлекла идея описания неравновесных диссипативных сред на основе динамики локализованных структур. Подобно тому, как динамику слабонелинейных сред можно описывать через взаимодействие соответствующих фундаментальных мод линейной системы, М. И. сделал предположение, что в сильнонелинейных средах роль таких мод могут играть локализованные структуры различной природы, например солитоны, спиральные волны и топологические дефекты. В таком случае поведение бесконечномерной распределённой системы может быть сведено к гораздо более простой конечномерной системе уравнений для координат, скоростей и фаз таких локализованных структур — суть возбуждений системы [19–22]. Данная концепция была успешно продемонстрирована на примере «возмущённых» фундаментальных нелинейных уравнений с частными производными, таких как уравнение синус-Гордона, уравнение Кортевега—де Фриза и нелинейное уравнение Шрёдингера, где в роли возмущений выступали пространственно-временная накачка энергии, диссипация или другие физические процессы. Были сформулированы необходимые условия существования таких устойчивых пространственно-локализованных возбуждений: одновременное наличие коротковолновой неустойчивости и субкритической бифуркации однородного состояния. Разработанная концепция оказалась весьма плодотворной и получила дальнейшее развитие в самых различных областях, от гидродинамики до физики биологических систем.

В эти же годы М. И. включился в исследования общих свойств синхронизации в связанных хаотических системах. Важную роль здесь сыграла работа [23], где было экспериментально продемонстрировано явление хаотической синхронизации. Эта и последующие работы заложили основы нового направления в теории шифрованных коммуникаций на основе синхронизации хаотических сигналов [24]. Но наибольший интерес М. И. оказался связан с исследованиями явления нелинейной синхронизации и, более широко, эффектов нелинейной динамики применительно к нейронным ансамблям. Начиная с середины 1990-х годов эта тематика стала основной областью его интересов.

Первые важные результаты М. И. в новом направлении были связаны с исследованием нелинейной динамики в системе двух связанных нейронов. Он инициировал постановку нейробиологами пионерских экспериментов *in vitro*, в которых была продемонстрирована нелинейная синхронизация и обусловленная ей иррегулярная активность в такой системе [25]. Последовавшее затем многолетнее сотрудничество М. И. с нейробиологами позволило значительно продвинуться в понимании роли нелинейных динамических явлений — хаоса, формирования структур (паттернов активности), синхронизации — в поведении относительно небольших ансамблей нейронов, формирующих разного рода генераторы биологического ритма. На основании многочисленных экспериментальных данных, в том числе полученных *in vitro* в специально синтезированных нейронных ансамблях, удалось не только построить модели, достаточно точно описывающие процесс перестройки паттернов нейронной активности в генераторах биологического ритма [26], но и создать на их основе электронные устройства, воспроизводящие такой процесс [27]. Эти устройства стали использоваться затем в качестве составных элементов при разработке биоподобных роботов [28, 29].

Указанным здесь исследованиям М. И. посвятил большой цикл своих работ, включая обзоры [30, 31]. Эти работы оказали значительное влияние на становление и развитие исследований по нейродинамике в ННГУ им. Н. И. Лобачевского и ИПФ РАН [32–34].

От изучения нелинейной динамики относительно малых нейронных ансамблей М. И. перешёл к теоретическому описанию больших нейронных сетей на примере обонятельной (ольфакторной) системы насекомых. На основе модели, следующей из анализа связанных систем классических уравнений популяционной динамики Лотки–Вольтерры, у него возникла новая ключевая идея о том, что динамика больших нейронных сетей следует принципу конкуренции без глобального победителя (*winnerless competition*), точнее с временным победителем, когда взаимодействие функциональных модулей таких сетей приводит к временному преобладанию (доминированию) отдельных модулей и их последовательным «переключениям», обеспечивая устойчивость поведения сети как целого. Математическим образом такого принципа является устойчивый гетероклинический канал в фазовом пространстве системы, соединяющий её многочисленные седловые состояния равновесия [35, 36]. В последующих работах М. И. применил этот математический аппарат к описанию последовательной памяти и взаимодействия когнитивной и эмоциональной функций человеческого мозга [37–40]. Опираясь на результаты визуализации мозговой активности с использованием современных методов электроэнцефалографии и магниторезонансной томографии, М. И. предложил оригинальную нелинейно-динамическую модель творческой активности в виде многомодального процесса взаимодействия действующих параллельно базовых нейросетей мозга (когнитивных мод) — сети пассивного режима (*default mode network*), ответственной за свободное спонтанное мышление в отсутствие внешних возбуждений и стимулов, сети принятия решений (*executive control network*), ответственной за обработку имеющейся у человека информации на основании прошлого опыта и знаний, и сети выявления значимости информации (*salience network*), роль которой заключается в координации информации из различных источников, включая автобиографическую память. В рамках такого подхода творческий процесс описывается универсальным образом (вне зависимости от того, в чём именно он заключается) как продукт конкурентного взаимодействия указанных базовых нейросетей, но не как результат доминирования одной из них или как результат «производства» определённой области самого мозга (на что и указывают данные современных нейробиологических экспериментов). Возможности построения на этой основе «математики мышления» ещё далеко не исчерпаны, пионерские идеи М. И. продолжают активно разрабатываться и находить свои применения [41–44].

Отметим в заключение, что за годы своей плодотворной научной деятельности М. И. написал также целый ряд учебников и монографий, которые могут быть отнесены к золотому фонду мировой литературы по колебательным и волновым процессам и нелинейной динамике [45–48]. Последняя из его монографий [49] и предшествующий ей обзор [40] посвящены вопросам динамического описания творческого мышления, которые глубоко интересовали М. И. не только как учёного, но и как человека, увлечённого поэзией и обладающего поэтическим даром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабинович М. И. // Докл. АН СССР. 1970. Т. 191, № 6. С. 1 253–1 256.
2. Рабинович М. И., Розенблюм А. А. // Докл. АН СССР. 1971. Т. 199, № 3. С. 575–578.
3. Рабинович М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, № 4. С. 477–510.
4. Богатырев Ю. К., Рабинович М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 1. С. 128–131.
5. Вышкинд С. Я., Рабинович М. И. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1976. Т. 71, № 2 (8). С. 557–571.
6. Пиковский А. С., Рабинович М. И., Трахтенгерц В. Ю. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1978. Т. 74, № 4. С. 1 366–1 374.
7. Рабинович М. И., Фабрикант А. Л. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1979. Т. 77, № 2 (8). С. 617–629.
8. Danca M.-F., Fečkan M., Kuznetsov N., Chen G. // Int. J. Bifurc. Chaos. 2016. V. 26, No. 2. Art. no. 1650038. <https://doi.org/10.1142/S0218127416500383>
9. Пиковский А. С., Рабинович М. И. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239, № 2. С. 301–304.
10. Кияшко С. В., Пиковский А. С., Рабинович М. И. // Радиотехника и электротехника. 1980. Т. 25, № 3. С. 336–343.
11. Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И., Старобинец И. М. // Докл. АН СССР. 1984. Т. 279, № 3. С. 596–601.
12. Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И., Старобинец И. М. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39, № 12. С. 561–564.
13. Арансон И. С., Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1985. Т. 89, № 1. С. 92–105.
14. Анищенко В. С., Арансон И. С., Постнов Д. Э., Рабинович М. И. // Докл. АН СССР. 1986. Т. 28, № 5. С. 1 120–1 124.
15. Езерский А. Б., Рабинович М. И., Реутов В. П., Старобинец И. М. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1986. Т. 91, № 6 (12). С. 2 070–2 083.
16. Рабинович М. И., Суцник М. М. // Успехи физ. наук. 1990. Т. 160, № 1. С. 3–64. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0160.199001a.0003>
17. Рабинович М. И. // Успехи физ. наук. 1978. Т. 125, № 1. С. 123–168. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0125.197805g.0123>
18. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М. : Наука, 1986. 736 с.
19. Aranson I. S., Gorshkov K. A., Lomov A. S., Rabinovich M. I. // Phys. D. Nonlinear Phenom. 1990. V. 43, No. 2–3. P. 435–453. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90146-G](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90146-G)
20. Aranson I. S., Gorshkov K. A., Lomov A. S., Rabinovich M. I. // Nonlinear Waves 3. Physics and Astrophysics. Proc. the Gorky School 1989 / ed. by A. V. Gaponov-Grekhov, M. I. Rabinovich, J. Engelbrecht. Berlin : Springer, 1990. P. 44–72. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75308-4_4
21. Арансон И. С., Рабинович М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 12. С. 1 514–1 517.

22. Korzinov L., Rabinovich M. I., Tsimring L. S. // *Phys. Rev. A*. 1992. V. 46, No. 12. P. 7601–7607. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.46.7601>
23. Афраймович В. С., Веричев Н. Н., Рабинович М. И. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1986. Т. 29, № 9. С. 1050–1060.
24. Larson L. E., Tsimring L. S., Abarbanel H. D. I., et al. // *Digital Communications Using Chaos and Nonlinear Dynamics* / ed. by L. E. Larson, L. S. Tsimring, J.-M. Liu. New York : Springer, 2006. P. 1–27. https://doi.org/10.1007/0-387-29788-X_1
25. Elson R. C., Selverston A. I., Huerta R., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81, No. 25. P. 5692–5695. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.5692>
26. Selverston A. I., Rabinovich M. I., Abarbanel H. D. I., et al. // *J. Physiol. Paris*. 2000. V. 94, No. 5–6. P. 357–374. [https://doi.org/10.1016/s0928-4257\(00\)01101-3](https://doi.org/10.1016/s0928-4257(00)01101-3)
27. Lee Y. J., Lee J., Kim Y. B., et al. // 2004 IEEE Intern. Symp. Circuits Systems (ISCAS). 23–26 May 2004, Vancouver, Canada. P. IV-744–IV-747. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2004.1329111>
28. Nowotny T., Zhigulin V. P., Selverston A. I., et al. // *J. Neurosci.* 2003. V. 23, No. 30. P. 9776–9785. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-30-09776.2003>
29. Szücs A., Varona P., Volkovskii A. R., et al. // *NeuroReport*. 2000. V. 11, No. 3. P. 563–569. <https://doi.org/10.1097/00001756-200002280-00027>
30. Абарбанель Г. Д., Рабинович М. И., Селверстон А. и др. // *Успехи физ. наук*. 1996. Т. 166, № 4. С. 363–390. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199604b.0363>
31. Rabinovich M. I., Varona P., Selverston A. I., Abarbanel H. D. I. // *Rev. Mod. Phys.* 2006. V. 78, No. 4. P. 1213–1265. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1213>
32. Масленников О. В., Пугавко М. М., Шапин Д. С., Некоркин В. И. // *Успехи физ. наук*. 2022. Т. 192, № 10. С. 1089–1109. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039042>
33. Emelianova A. A., Nekorkin V. I. // *Regul. Chaotic Dyn.* 2025. V. 30. P. 57–75. <https://doi.org/10.1134/S1560354725010046>
34. Дмитричев А. С., Касаткин Д. В., Клиньшов В. В. и др. // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2018. Т. 26, № 4. С. 5–58. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-5-58>
35. Rabinovich M., Volkovskii A., Lecanda P., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2001. V. 87, No. 6. Art. no. 068102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.068102>
36. Rabinovich M., Huerta R., Laurent G. // *Science*. 2008. V. 321, No. 5885. P. 48–50. <https://doi.org/10.1126/science.1155564>
37. Рабинович М. И., Мюезинолу М. К. // *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180, № 4. С. 371–387. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201004b.0371>
38. Rabinovich M. I., Afraimovich V. S., Bick C., Varona P. // *Phys. Life Rev.* 2012. V. 9, No. 1. P. 51–73. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2011.11.002>
39. Afraimovich V., Gong X., Rabinovich M. // *Chaos*. 2015. V. 25, No. 10. Art. no. 103118. <https://doi.org/10.1063/1.4932563>
40. Рабинович М. И., Варона П. // *Успехи физ. наук*. 2021. Т. 191, № 8. С. 846–860. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.09.038837>
41. Ashwin P., Coombes S., Nicks R. // *J. Math. Neurosci.* 2016. V. 6. Art. no. 2. <https://doi.org/10.1186/s13408-015-0033-6>
42. Safron A., Klimaj V., Hipólito I. // *Front. Syst. Neurosci.* 2022. V. 15. Art. no. 688424. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.688424>
43. Berbel B., Latorre R., Varona P. // *Neurocomputing*. 2024. V. 578. Art. no. 127378. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.127378>
44. Brecej T., Petrič T. // *Sensors*. 2023. V. 23, No. 3. Art. no. 1396.

<https://doi.org/10.3390/s23031396>

45. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. М. : Наука, 1984. 564 с.
46. Gaponov-Grekhov A. V., Rabinovich M. I. Nonlinearities in Action. Oscillations, Chaos, Order, Fractals. Berlin : Springer-Verlag, 1992. 202 p.
47. Abarbanel H. D., Rabinovich M. I., Sushchik M. M. Introduction to Nonlinear Dynamics for Physicists. Singapore : World Scientific, 1993. 168 p.
48. Rabinovich M. I., Ezersky A. B., Weidman P. D. The Dynamics of Patterns. Singapore : World Scientific, 2000. 336 p.
49. Principles of Brain Dynamics. Global State Interactions / ed. by M. I. Rabinovich, K. J. Friston, P. Varona. Cambridge, USA : MIT Press, 2023. 360 p.

Поступила в редакцию 21 апреля 2025 г.; принята в печать 30 апреля 2025 г.

SCIENTIFIC WORKS OF M. I. RABINOVICH AND MODERN THEORY OF OSCILLATIONS AND WAVES

I. S. Aranson, A. I. Malekhanov, V. I. Nekorkin, A. S. Pikovsky, L. S. Tsimring, and A. L. Fabrikant

We present a brief overview of scientific works by Mikhail I. Rabinovich, reflecting their main directions in the context of oscillation–wave research of the last six decades.