

НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ В ТЕОРИИ САМООРГАНИЗОВАННОЙ КРИТИЧНОСТИ

Цикл работ: 2014-2015

А. В. Милованов, ведущий научный сотрудник ИКИ РАН

Аннотация – Данный цикл посвящен актуальным проблемам теории самоорганизованной критичности, перспективам их решения, а также возможным приложениям в области космической и лабораторной плазмы. На первый план вынесены концептуальные вопросы, по которым отсутствует единое мнение в литературе. Отдельно рассмотрены транспортные явления большой амплитуды, а также аномальные и катастрофические явления в сложных системах. Ставится задача о распознавании наступающих катастрофических явлений по специфическим спектральным признакам. Особое внимание уделено физике нелокального переноса в смысле статистики Гнеденко-Колмогорова. Показано, что нелокальность возникает в процессах самоорганизации к критическому состоянию под действием определенных механизмов амплификации, нарушающих условия центральной предельной теоремы. Полученные результаты имеют как общетеоретическое, так и прикладное значение. Излагаемые новые подходы анализа процессов переноса и гипотезы самоорганизованной критичности нового типа применяются для исследования ряда задач (в частности, турбулентных течений в краевой плазме и пристеночном *scrape-off* слое тороидальных магнитных ловушек, процессов индуцированного возникновения вихрей в сильной электростатической турбулентности, корональных выбросов аномально большой амплитуды и т. д.)

На конкурс 2015 г. вынесены в общей сложности 3 работы [1–3], составляющие единый цикл теоретических исследований под общим названием "Новые горизонты в теории самоорганизованной критичности". Данный цикл состоит из **обзорной статьи** "Twenty-five years of self-organized criticality: Geospace and fusion plasma" (в соавторстве с ведущими специалистами в области космической физики и нелинейной динамики) и двух **оригинальных работ** [2, 3] (совместно с традиционными соавторами из Дании Йенсом Расмуссеном и Израиля Александром Йоминым). Содержит результаты, опубликованные (принятые к публикации) в период с декабря 2014 г. по сентябрь 2015 г. и прошедшие полное рецензирование по стандартам "peer review" в ведущих научных издательствах: Springer (Space Science Reviews; Input factor = 5.874), Cambridge University Press (Journal of Plasma Physics), L&H Scientific Publishing (International Journal of Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity). Ни одна из представленных работ ранее на конкурс ИКИ не выдвигалась.

Обзор [1] содержит современное изложение теории самоорганизованной критичности и аспектов её приложений в физике космической и лабораторной плазмы. Представляет собой последний, заключительный обзор из трилогии "Twenty-five years of self-organized criticality", написанный по приглашению и финансовой поддержке Международного института космической физики: "International Space Science Institute", Берн, Швейцария. Особо рассмотрены процессы самоорганизации неравновесной космической плазмы в магнитосфере Земли и межпланетном пространстве. Освещены также некоторые, связанные с динамикой хвоста магнитосферы вопросы авроральной активности и возникновения частиц высоких энергий. Рассмотрена взаимосвязь явления самоорганизованной критичности с представлениями о гидродинамической турбулентности, многомасштабности, эволюционными процессами, фазовыми переходами II рода. Резюмируются результаты

наблюдений и экспериментов, анализируется накопленный экспериментальный материал, выделены нерешенные проблемы как в общей теории, так и в свете обработки и интерпретации данных наблюдений. Окончательная версия обзора дополнена изложением термодинамического подхода на основе энтропии Тсаллиса.

Во избежание недоразумений подчеркнем, что речь идет о совершенно новом обзоре [1], ранее на конкурс ИКИ не выдвигавшемся. Два других обзора: "Twenty-five years of self-organized criticality: Solar and Astrophysics" и "Twenty-five years of self-organized criticality: Mathematical physics" содержат попытку охватить явления самоорганизованной критичности в физике Солнца и астрофизике с единых концептуально-теоретических позиций. (В 2014 году на конкурс ИКИ был выдвинут второй обзор трилогии: "Twenty-five years of self-organized criticality: Solar and Astrophysics", отличающийся также и коллективом авторов. Данный обзор был опубликован on-line 15 июля 2014 г.)

В работе [2] показано, что обменные процессы в сложных системах и связанное с ними формирование самоорганизованных критических состояний могут конкурировать с процессами обратной спектральной перекачки энергии от малых масштабов в большие, характерными, в частности, для двумерной гидродинамической турбулентности. В результате в системе возникают состояния нового типа, отличные от обычных критических состояний на пороге хаоса. Их отличительным признаком являются процессы переноса аномально высокой интенсивности, связанные с возникновением и распадом когерентных диссипативных структур. Примерами служат вихревые структуры в горячей замагниченной плазме и порождаемые ими аномально высокие потери вещества и энергии в тороидальных магнитных ловушках – токамаках и стеллараторах. Более конкретно речь идет о том, что в сложных системах аномальные и катастрофические (возникающие в процессах взаимодействия когерентных структур) явления случаются намного чаще, чем можно было бы предвидеть на основе только традиционной теории вероятностей. Рассмотрены механизмы возникновения подобных явлений в задаче о сильной электростатической турбулентности с использованием уравнений Хасегавы-Вакатани. Показано, что порогом возникновения аномальных явлений большой амплитуды является малость времени Ринеса (Rhines time) по сравнению с характерным временем развития неустойчивостей. Данное условие выполняется в режиме сильной нелинейности и подразумевает значительные отклонения состояний системы от маргинально устойчивого состояния (state of marginal stability) на пороге хаоса. Аналогичные условия получены для геофизических (geophysical fluid) потоков с поперечным сдвигом и образования крупномасштабных вихревых структур в атмосфере.

Наконец, в оригинальной работе [3] сформулирован гамильтонов подход к описанию самоорганизованного критического поведения в сложных системах на основе дискретного уравнения Андерсона со случайным потенциалом и нелинейностью алгебраического типа. Показано существование фазового перехода из локализованного в свободное состояние вблизи сепаратрисы (для квадратичной нелинейности), с этой целью разработан метод редуцированного отображения на дерево Кэли (the "backbone" map). Устанавливается связь уравнения Андерсона с обобщенными (немарковскими) процессами переноса в пространстве волновых чисел. Излагаемый новый подход к анализу немарковости применен для вывода уравнения диффузии с дробной производной по времени. Построена топологическая классификация дискретного уравнения Андерсона по порядку нелинейности, получены ограничения на тип самоорганизованного критического поведения в пределе больших времен. Получены значения индекса связности в области сепаратрисы для произвольной степени нелинейности. Интересно, что в случае квадратичной нелинейности

абсолютная величина индекса связности совпадает со значением, ранее полученным в работах Л. М. Зеленого и **А. В. Милованова** на основе анзаца Александера-Орбаха (“Успехи физических наук: Обзоры актуальных проблем”, Том 174, С. 809–852, Август 2004). Отметим, что первоначальная версия работы [3] была принята к публикации в журнале *Journal of Statistical Physics* (impact factor = 1.866), однако ввиду ряда открывшихся обстоятельств авторами было принято нестандартное решение отозвать свою работу, дополнить её новыми результатами по теории связности, показать их соответствие нелинейному уравнению Андерсона со случайным потенциалом, и в конечном счете опубликовать окончательную версию статьи в *International Journal of Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity*. Отметим также, что метод нелинейного уравнения Андерсона обсуждается в ещё одной работе F. Zonca, L. Chen, S. Briguglio, G. Fogaccia, **A. V. Milovanov**, Z. Qiu, G. Vlad, and X. Wang, "Energetic particles and multi-scale dynamics in fusion plasmas", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 57, art. 014024 (2015). Данная работа, тем не менее, имеет лишь касательное отношение к теории самоорганизованной критичности и в цикл работ [1–3], выдвигаемый на конкурс ИКИ, не включена.

Результаты, отмеченные в цикле работ [1–3], неоднократно докладывались на научных мероприятиях и симпозиумах – в частности, на прошедшей в августе 2014 г. 40-ой Ассамблее КОСПАР, а также на прошедшей в январе 2015 г. в Риме международной конференции “Complex Plasma Phenomena in the Laboratory and in the Universe”.

Полный список работ, выдвигаемых на конкурс:

[1] – Обзорная статья:

A. Surjalal Sharma, Markus J. Aschwanden, Norma B. Crosby, Alexander J. Klimas, **Alexander V. Milovanov**, Laura Morales, Raul Sanchez, and Vadim Uritsky, *Twenty-five years of self-organized criticality: Space and laboratory plasmas*, *Space Sci. Rev.* (50 pp. – accepted for publication 15 Sept 2015).

Impact factor: 5.874.

[2]

Alexander V. Milovanov and Jens Juul Rasmussen, *Self-organized criticality revisited: Nonlocal transport by turbulent amplification*, *J. Plasma Phys.* (13 pp. – 2 color illustrations; accepted for publication 23 Sept 2015).

[3]

Alexander V. Milovanov and Alexander Iomin, *Topology of delocalization in the nonlinear Anderson model and anomalous diffusion on finite clusters*, *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity (DNC)* vol. 4 (2) pp. 151–162 (2015).