

УДК 550.34.01:550.348.436

DOI: 10.24411/2226-7271-2018-11064

**Стаховский И.Р.**

## Методы неравновесной физики в современной сейсмологии: к юбилею Института физики Земли РАН

Стаховский Игорь Ростиславович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук»

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-6382-358>

E-mail: igor-r-stakhovsky@j-spacetime.com; stakhov@ifz.ru; igorstakhovsky@gmail.com

Описаны основные этапы проникновения в отечественную сейсмологию методов неравновесной физики. Выдающуюся роль в этом процессе сыграли сотрудники ИФЗ академики А.М. Обухов, М.А. Садовский, В.И. Кейлис-Борок. Рассматривается значение уникальной научной школы ИФЗ, основанной академиком О.Ю. Шмидтом, в современном уровне развития сейсмологии и физики разрушения горных пород.

**Ключевые слова:** Институт физики Земли РАН; землетрясения; сейсмичность; неравновесность; диссипативные структуры; неравновесная физика.

### Введение

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии наук – одно из старейших и одно из крупнейших научных учреждений России в области геофизики. Научная тематика, развиваемая в ИФЗ РАН, чрезвычайно широка, – она включает исследования в области планетарной геофизики и геодинамики, разведочной геофизики, исследования магнитного, электромагнитного и гравитационного полей Земли, изучение и систематизацию физических свойств горных пород, исследования современной сейсмичности, палеосейсмичности и процессов подготовки землетрясений, а также сейсмологические исследования земных недр. В прошедшие годы в ИФЗ работали 9 академиков и 11 членов-корреспондентов АН СССР и РАН, 5 академиков и 6 членов-корреспондентов РАН возглавляют работу Института сегодня. Научные достижения сотрудников ИФЗ не раз отмечались Государственными и международными премиями. На исторических выражах название Института неоднократно менялось, – он назывался Институтом теоретической геофизики, Геофизическим институтом, Институтом физики Земли, Объединенным институтом физики Земли. С 2004 г. он носит привычное сегодня название – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН).

В год своего 90-летия ИФЗ РАН по-прежнему остается одной из ведущих научных школ России, успешно развивающей как традиционные, так и перспективные направления научных исследований. Одним из таких перспективных направлений является изучение неравновесных и нелинейных геофизических систем, тесно связанное с использованием методов, появившихся и развитых в последние десятилетия XX века, – нелинейной динамики, теории неравновесных процессов, теории диссипативных структур, теории катастроф, теории перколяции, теории фракталов и т.д. Эти методы оказались чрезвычайно востребованы во многих естественнонаучных дисциплинах, в частности – в метеорологии, гидрологии, вулканологии, сейсмологии и других областях геофизики.

Безусловно, особое место среди неравновесных природных процессов, эволюция которых оказывает огромное, причем часто – катастрофическое воздействие на жизнь сотен тысяч людей, занимает сейсмический процесс. С момента изобретения сейсмографа академиком Б.Б. Голицыным и основания тем самым сейсмометрии как точной науки прошло уже более 110-и лет. Возможность количе-

ственных оценок параметров землетрясений привела к рождению сейсмологии. В 1958 г. Ч. Рихтер<sup>1</sup>, основатель современной сейсмологии, определил предмет своей науки предельно емко: «Сейсмология – это наука о землетрясениях». Ч. Рихтер противопоставил это определение распространенному в те годы мнению, согласно которому сейсмология сводится в основном к умению читать сейсмограммы. На самом деле землетрясения – феномен, являющийся следствием проявления самых различных законов природы, относящихся к самим основам организации материи, пространства и времени. Современная наука о землетрясениях – чрезвычайно синтетическая и мультидисциплинарная область знания. К концу XX века стало понятно, что предмет сейсмологии не просто выходит за рамки классической сейсмометрии, он выходит за рамки классической физики.

Сейсмология тесно связана с уровнем развития смежных научных дисциплин, в первую очередь – с уровнем развития физики и физхимии. В конце XX века эти науки сделали качественный скачок в своем развитии, – сформировалась теория неравновесных физико-химических процессов, продемонстрировавшая, в частности, что свойства неравновесных многокомпонентных систем качественно отличаются от свойств этих же систем в равновесии. Сейсмология оказалась одной из тех прикладных наук, которую теория неравновесных процессов затрагивает в первую очередь, ведь сейсмичность – сугубо неравновесный процесс, не подчиняющийся законам классической (равновесной) физики.

Радикальные изменения в научном мировоззрении всегда сталкиваются со здоровым консерватизмом научного сообщества, поэтому проникновение методов неравновесной физики в сейсмологию происходило не просто и не быстро. В России этот процесс осуществлялся в основном на научных площадках Института физики Земли, головной научной организации в области сейсмологии в нашей стране. Уникальную роль ИФЗ в формировании новой методологии сейсмологических исследований, основанной на использовании новых законов природы, законов неравновесного мира, мы и рассмотрим далее. Эта роль показательна в том смысле, что и в прикладных науках фундаментальная научная школа развивает и поддерживает даже те научные направления исследований,

которые используют сложные и в значительной степени абстрактные математические понятия, оперируют ненаблюдаемыми физическими категориями и на начальных этапах не обещают сиюминутных результатов. Но только на этом пути конечный результат создает новую физическую реальность, предоставляет новые способы анализа неформализуемых ранее проблем, предлагает вполне прагматичные методы решения практически полезных задач. Научную школу ИФЗ РАН можно отнести к таким фундаментальным научным школам.

### Неравновесная физика, сейсмология и ИФЗ

В первой половине XX века внимание большинства исследователей неравновесных природных процессов было сосредоточено в основном на таком явлении как турбулентность. Попытки описать гидро и газодинамические турбулентные потоки в рамках известных законов классической физики предпринимались неоднократно, но традиционно заканчивались неудачами. Прорыв на этом пути связан с работами английского метеоролога и математика Л.Ф. Ричардсона, который в 1926 г. предложил принципиально новую схему структурной организации турбулентного потока, называемую сегодня каскадной. Л.Ф. Ричардсон понял<sup>2</sup>, что крупный турбулентный вихрь может быть разбит на более мелкие вихри, которые в свою очередь могут быть разбиты на еще более мелкие и т.д., причем масштабный диапазон подобного разбиения ограничен только масштабным диапазоном существования самого турбулентного потока. Тем самым Л.Ф. Ричардсон ввел в рассмотрение базовую феноменологию турбулентности, которая включает в себя представления о масштабной инвариантности (самоподобии) как о структурообразующем факторе неравновесных процессов. Характерные аспекты таких процессов заключаются в том, что динамические взаимодействия элементов системы осуществляются преимущественно между элементами одного масштаба, а передача энергии с одного масштаба на другой происходит без существенных потерь (вплоть до масштабов, на которых начинает действовать вязкость).

В годы, когда естественнонаучные знания основывались преимущественно на использовании дифференциального исчисления, открытие Л.Ф. Ричардсона стало революционным. Каскадный процесс не мог быть описан дифференциальным уравнением. Непрерывные недифференцируемые функции были известны в математике и раньше, но, пожалуй, впервые для них нашлось применение в реальных физических системах. Физики обнаружили, что используемое ими функциональное пространство недостаточно для описания окружающей их природы.

<sup>1</sup> Richter C.F. *Elementary Seismology*. San Francisco: W.H. Freeman and Co, 1958. 268 p.

<sup>2</sup> Richardson L.F. "Atmospheric Diffusion (Shown on a Distance-neighbour Graph)." *Proc. Roy. Soc. A*214.756 (1926): 709–737.

Тем не менее, сам Л.Ф. Ричардсон, вошедший в историю благодаря разработанным им численным методам прогноза погоды, не сумел привести свою идею структурного каскада к математически формализованному виду. Спустя много лет это сделал выдающийся советский геофизик, ученик А.Н. Колмогорова А.М. Обухова.

В 1940 г. 22-летний сотрудник Московской геофизической обсерватории А.М. Обухов перешел на работу в Математический отдел Института теоретической геофизики Академии Наук СССР. В 1941 г. он защитил кандидатскую диссертацию под научным руководством замечательного математика академика А.Н. Колмогорова, в 1948-м получил ученое звание доктора физико-математических наук. В 1946-м, когда из Сейсмологического института и Института теоретической геофизики был создан единый Геофизический институт (ГЕОФИАН), директором которого стал академик О.Ю. Шмидт, А.М. Обухов уже руководил лабораторией.

Совместно с А.Н. Колмогоровым А.М. Обухов является создателем теории мелкомасштабной локально-изотропной турбулентности, в рамках которой каскадная модель Л.Ф. Ричардсона приобрела математически законченную форму<sup>1</sup> и окончательное название – мультипликативный каскад.

Мультипликативную каскадную процедуру не следует считать лишь техническим приемом, позволяющим моделировать структуру турбулентного потока. Эта математическая техника и сегодня является важным инструментом изучения масштабно-инвариантных полей различной физической природы, например, сейсмических полей. Мультипликативные каскады адекватно представляют свойства геофизических неупорядоченных и нелинейных сред с негауссовым распределением вероятности появления локальных критических переходов (например, появления точек разрушения в неравновесном массиве горной породы). По сути, мультипликативные каскады предоставили возможность аналитического описания мультифрактальных полей задолго до появления самого понятия «мультифрактал». Еще в 1954 г. (почти за 30 лет до появления фрактальной геометрии и осознания физиками важнейшей роли подобия в описании неравновесных процессов), А.М. Обухов отмечал:

«При анализе весьма сложных явлений турбулентности целесообразно использовать методы теории подобия»<sup>2</sup>.

В 1956 г. в процессе очередной реорганизации по решению Академии Наук от ГЕОФИАНа отделились и были превращены в самостоятельные научные учреждения Институт физики атмосферы и Институт прикладной геофизики. А.М. Обухов возглавил Институт физики атмосферы (ИФА). В 1970 г. он был избран действительным членом АН СССР.

Оставшаяся часть ГЕОФИАНа получила привычное сегодня название Институт физики Земли. Профилирующей тематикой Института стало исследование физических процессов, происходящих в твердотельном массиве горных пород и земных недрах. Неравновесные процессы, происходящие в массиве горной породы, – это, прежде всего, самопроизвольное разрушение, возникающее без приложения сосредоточенной нагрузки к разрушающемуся материалу, т.е. трещинообразование и сейсмичность. Задача по их исследованию была более чем актуальной и в 1960-е годы.

Однако в рамках используемых в то время равновесных моделей (основанных на решении задач теории упругости) разрушение внутри массива не могло быть объяснено без привлечения неочевидных физических механизмов (например, диффузии воды). Гипотеза о диффузии воды в качестве «триггерного механизма», провоцирующего землетрясения, иногда высказывается и сегодня, хотя, по сути, она была экспериментально опровергнута уже к концу 60-х годов прошлого века, когда американские астронавты установили сейсмографы на Луне. Выяснилось, что на Луне сейсмичность весьма активна, тогда как несвязанные флюиды не обнаружены там до сих пор. Предположение о более вероятном механизме возникновения макроразрывов в массиве – критическом переходе в процессе микротрещинообразования – могло появиться лишь гораздо позже, после выявления масштабного инвариантного характера микротрещинообразования и открытия академиком С.Н. Журковым масштабного инвариантного критерия слияния трещин.



Александр Михайлович Обухов (1918–1989) и Андрей Николаевич Колмогоров (1903–1987)

<sup>1</sup> Obukhov A. "Some Specific Features of Atmospheric Turbulence." *J. Geophys. Res.* 67 (1962): 3011–3014; Kolmogorov A.N. "A Refinement of Previous Hypotheses Concerning the Local Structure of Turbulence in a Viscous Incompressible Fluid at High Reynolds Number." *J. Fluid Mech.* 13 (1962): 82–85.

<sup>2</sup> Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Ленинград: Гидрометеоздат, 1988. 414 с.



Ян Каган (Yan Y. Kagan). Фото с сайта <https://epss.ucla.edu/people/researchers/412/>

А в 1967 г. в ИФЗ защитил кандидатскую диссертацию 32-летний Я.Я. Каган, представивший работу по локации акустических импульсов в горных выработках с целью исследования процесса разрушения горного массива. Уже в этой работе было сформулировано предположение о пространственном самоподобии дизъюнктивных нарушений в массиве горных пород. Я.Я. Кагану принадлежит знаменитое определение сейсмичности как «турбулентности в твердом теле»<sup>1</sup>, а в 1980 г. он (совместно с Л. Кнопоффом) показал факт наличия самоподобия в пространственных распределениях сейсмичности<sup>2</sup>, используя данные Южно-Калифорнийского сейсмологического каталога и методы теории корреляционного интеграла. Сегодня Я.Я. Каган (с 1974-го года живущий и работающий в США) – один из ведущих сейсмологов Калифорнийского университета в Лос-Анжелесе (UCLA), занимающийся исследованием нелинейных аспектов сейсмического процесса и вопросами сейсмического прогноза.

И все же 70-е годы прошлого века в физике разрушения горных пород и физике сейсмического процесса явились годами тотального преобладания методов линейной равновесной механики, причем как в СССР, так и в мире. В эти годы в ИФЗ сложился исключительно сильный коллектив геомехаников, а теория очага тектонического землетрясения, построенная Б.В. Костровым, одним из наиболее выдающихся механиков, работавших в ИФЗ, рассматривалась как основа любого исследования сейсмичности. Методы неравновесной физики еще не проникли в сейсмологию как таковую.

Но сама по себе неравновесная физика в 70-е годы бурно развивалась. Уже к началу 1970-х годов были разработаны основные положения теории бифуркаций<sup>3</sup>, изучающей качественные изменения в поведении фазовых траекторий динамических систем в фазовых пространствах при малых изменениях параметров описывающих эти системы эволюционных уравнений. В эти же годы опубликовано немало работ по теории катастроф<sup>4</sup>, включающей в себя теорию бифуркаций. Появилась теория ренорм-групп<sup>5</sup>, за создание которой К. Вильсон удостоился Нобелевской премии по физике 1982 г., и элементы которой входят как составные части в разработанный позже мультифрактальный анализ. Тогда же в общих чертах была создана и теория перколяции<sup>6</sup>, описывающая возникновение связанных структур (бесконечных кластеров) в стохастических средах, состоящих из дискретных элементов. И.Р. Пригожин, Нобелевский лауреат по химии 1977 г., в это же время построил теорию диссипативных структур и теорию самоорганизации<sup>7</sup>, объясняющие возникновение устойчивых пространственно-временных неоднородных структур в результате развития неустойчивостей в неравновесных диссипативных средах.

Новая физика предлагала новые методы исследователям неравновесных природных процессов. Фактически детерминистические подходы, характерные для классической физики, заменялись статистическими. Эволюция неравновесных систем не описывается детерминистическими уравнениями или параметрическими поправками к законам классической физики, она реализуется через последовательность бифуркаций, превращая развитие неравновесных систем в необратимый процесс. Это приводит к кажущемуся парадоксу, – свойства одной и той же системы в равновесии и неравновесности могут быть совершенно различны. На самом деле, этот парадокс разрешается достаточно просто: свойства равновесной системы определяются нулевыми флуктуациями параметров (или, по крайней мере, – пренебрежимо малыми флуктуациями), тогда как в неравновесном состоянии свойства системы начинают определяться неограниченным ростом флуктуаций. Именно флуктуации приводят к самоорганизации системы и образованию диссипативных структур. Точно так же свойства равновесной системы никак не связаны с диссипацией энергии, тогда как в неравновесном состоянии свойства той же системы начинают зависеть не только от самого факта диссипации, но также и от механизма диссипации. Законы эволюции системы радикально меняются. Иными словами,

<sup>1</sup> Kagan Y.Y. "Seismicity: Turbulence of Solids". *Nonlinear Science Today* 2 (1992): 8–18.

<sup>2</sup> Kagan Y.Y., Knopoff L. "The Spatial Distribution of Earthquakes: the Two-Point Correlation Function." *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 62 (1980): 303–320.

<sup>3</sup> Андронов А. А., Леонтович Е. А., Гордон И. М., Майер А. Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1967. 487 с.

<sup>4</sup> Zeeman, E.C. *Catastrophe Theory – Selected Papers 1972–1977*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977. 150 p.

<sup>5</sup> Wilson K.G. "The Renormalization Group and Critical Phenomena." *Rev. Mod. Phys.* 55 (1983): 583–590.

<sup>6</sup> Kesten H. *Percolation Theory for Mathematicians*. Boston: Birkhauser, 1982. 300 p.

<sup>7</sup> Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems from Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. New York, London, Sydney, and Toronto: John Wiley & Sons, 1977. 400 p.

адекватно моделировать поведение неравновесной системы решениями краевых задач, моделирующих свойства этой же системы в равновесии, невозможно в принципе.

Понимание этого факта геофизиками, привыкшими описывать деформации твердых сред уравнениями теории упругости и продолжавшими применять методы равновесной физики для изучения неравновесных систем (например, очагов готовящихся землетрясений), не могло произойти мгновенно. Однако 1980-е годы – это годы интенсивного проникновения в геофизику методов неравновесной физики. Масштабная инвариантность – фундаментальное свойство неравновесного процесса разрушения горных пород – не находило объяснения в рамках классической физики, но постоянно проявлялось в результатах экспериментальных исследований процесса разрушения. Одним из первых на это обратил внимание академик М.А. Садовский, занимавший в то время пост директора ИФЗ.

М.А. Садовский большую часть жизни занимался физикой взрыва, в частности, он был первым научным директором Семипалатинского ядерного испытательного полигона. Особое свойство процесса разрушения горных пород, которое «не может быть описано в рамках принятых геологических и физико-химических понятий о горной породе», было замечено им в начале 80-х годов прошлого века и названо свойством «дискретности» горных пород<sup>1</sup>. Приведенная цитата показывает, что с самого начала у М.А. Садовского и его сотрудников не было сомнений в том, что они изучают качественно новое, неизвестное на тот момент явление. Некоторое время для этого явления даже не удавалось подобрать соответствующего определения. Иерархичность? Автомодельность? Необъяснимыми казались и результаты этих работ, например, иерархическая шкала «кусковатости» с преимущественными размерами кусков горной породы, образующихся после разрушения массива. Характерные размеры кусков оказались распределены не хаотично, они образовывали иерархические распределения по закону геометрической прогрессии. Масштабный диапазон существования этого эффекта оказался необычайно широким, в иерархическую шкалу М.А. Садовского укладывались даже размеры планет. Это привело к рождению блочно-иерархической модели геосреды, генерирующей самоподобный сейсмический процесс.

«Сейсмический процесс сближает с одним содержательным классом нелинейных динамических систем наличие явления самоподобия», –

писали в своей монографии в 1991 г. М.А. Садовский и В.Ф. Писаренко, объясняя самоподобие сейсмичности строением сейсмогенерирующей среды<sup>2</sup>.

К этому времени относятся и работы сотрудников Отдела вычислительной геофизики ИФЗ по применению теории перколяции к описанию процесса разрушения горных пород<sup>3</sup>. Однако интерес к методам теории перколяции выходил за рамки Института. В частности, в 1985 г. в ИФЗ была защищена докторская диссертация по перколяционным методам в механике геоматериалов (диссертант – Т.Л. Челидзе, сотрудник тбилисского Института геофизики им. М.З. Нодия, – сегодня академик АН Грузии). Задача физики разрушения горных пород близка к задаче теории перколяции (определению вероятности появления бесконечного кластера из первоначально несвязанных дискретных элементов), т.к. макроразрывы в горных породах всегда образуются из первоначально несвязанных микротрещин. Однако задача физики разрушения сложнее задачи теории перколяции, поскольку макроразрывы в горных породах формируются за счет слияния микротрещин, т.е. процесса, аналога которому в теории перколяции нет.

1980-е годы – время, когда отдельные, преимущественно не связанные между собой работы по изучению неравновесных процессов в геофизике уступили место широкому, системному подходу, включающему в себя не только возможность получения количественных оценок параметров неравновесных систем и численное моделирование нелинейных эффектов, но и междисциплинарное взаимопроникновение методов, развитых, казалось бы, для исследования совершенно разных процессов. Появилась концепция «классов универсальности»<sup>4</sup>, позволяющая использовать одни и те же методы для описания систем разной физической природы, если системы принадлежат к одному классу уни-



Михаил Александрович Садовский (1904–1994)

<sup>1</sup> Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3–18.

<sup>2</sup> Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.

<sup>3</sup> Молчанов С.А., Писаренко В.Ф., Резников Ф.Я. О перколяционном подходе в теории разрушения // Вычислительная сейсмология. 1986. № 19. С. 3–8.

<sup>4</sup> Wilson K.G. "Problems in Physics with Many Scales of Length." *Sci. Am.* 241 (1979): 158–179.

версальности, определяемому размерностью пространства и числом обобщенных координат системы. Рассмотрение категорий столь высокой степени абстракции как классы универсальности представляет собой несомненное достижение современной физики. Однако главной причиной столь радикальных изменений в неравновесной геофизике стало появление фрактальной геометрии, событие столь значительное, что на нем следует остановиться особо.

Созданная Б. Мандельбротом фрактальная геометрия<sup>1</sup> – математическая теория, но наиболее широкое применение она нашла в естественных науках и физике неравновесных процессов. Фрактальная геометрия позволила обнаружить и исследовать в неравновесных системах, образно говоря, новое «измерение» – масштаб. Этого «измерения» нет в задачах классической физики, в которых рассматривается, как правило, один масштаб исследуемого процесса. Однако очень многие геофизические процессы реализуются в чрезвычайно широких масштабных диапазонах, причем явления, наблюдаемые на крупных масштабах, вызываются причинами, действующими на микроскопических масштабных уровнях. Характерная черта исследования любого геофизического процесса в «дофрактальную» эпоху всегда заключалась в фатальной неизбежности усечения этого масштабного диапазона до одного единственного масштаба, т.е. в изучении одного масштаба процесса независимо от другого. Качественные потери в результатах анализа эволюции сложных систем при таком подходе хорошо выражает известный фразеологизм «за деревьями не видеть леса».

Фрактальная геометрия объединила перечисленные выше частные теории поведения неравновесных систем в единую (пока еще не законченную) теорию неравновесных процессов. Диссипативные структуры, которые И.Р. Пригожину не удавалось описать аналитически, получили описание в категориях фрактальной геометрии, поскольку они имеют масштабно-инвариантную организацию. Фрактальными оказались и многие перколяционные структуры. Мультифрактальный анализ вобрал в себя некоторые методы теории ренорм-групп. Возникшая общность аналитического инструментария для исследования неравновесных систем привела к фундаментальному открытию, – выяснилось, что поведение неравновесных систем в значительной степени не зависит от физической природы системы. Неравновесные системы разной физической природы могут быть описаны в одних и тех же категориях фрактальной геометрии.

И, наконец, фрактальная геометрия не только предоставила неравновесной физике универсальный математический аппарат, но и сформировала саму методологию исследования неравновесных процессов. Появление фрактальных структур в ходе эволюции сложных диссипативных систем стало восприниматься как индикатор перехода системы в критическое состояние, потенциально опасное катастрофическими событиями. Это в свою очередь позволило использовать методы фрактальной геометрии в комплексах мероприятий, направленных на прогноз таких событий как землетрясения, извержения вулканов, появление тайфунов и т.д.

Неудивительно, что последние десятилетия XX века в естественнонаучных дисциплинах ознаменовались резким ростом числа исследований, в которых фрактальная организация обнаруживалась у самых различных природных процессов и систем. Фрактальная структура – характерная особенность неравновесных систем. Эти исследования привели физиков к выводу, который сегодня воспринимается уже как общее место: природа создана неравновесными процессами и создается ими в настоящее время. Фрактальность распространена в природе повсеместно.

Конечно, аппарат фрактальной геометрии немедленно нашел применение и в работах сотрудников ИФЗ. Одними из первых в мире они продемонстрировали фрактальный характер пространственных распределений эпицентров сейсмических событий<sup>2</sup>. В ИФЗ были проведены десятки работ, приведших к тому, что сегодня масштабная инвариантность воспринимается уже как никем не оспариваемый атрибут сейсмического процесса. Среди большого числа публикаций по этой теме в мире работы сотрудников ИФЗ занимают заметное место и относятся к числу наиболее цитируемых.

В то же самое время методы фрактальной геометрии начали широко применяться и в физике разрушения горных пород. Процесс разрушения исследовался во всем масштабном диапазоне своего существования, а этот диапазон почти астрономический, – отношение длины геологического разлома на поверхности Земли к длине микротрещин, образующихся на уровне кристаллической решетки минералов, слагающих горные породы, может достигать  $2^{50}$  и более. В силу специфики тематики ИФЗ его сотрудники проводили исследования пространственных распределений наиболее крупномасштабных дизъюнктивных нарушений земной коры – сейсмоактивных разломов. Здесь сказалась характерная

<sup>1</sup> Mandelbrot B. *Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W.H. Freeman, 1982. 468 p.

<sup>2</sup> Geilikman M.B., Golubeva T.V., Pisarenko V.F. "Multifractal Patterns of Seismicity." *Earth and Planetary Science Letters* 99.1–2 (1990): 127–132.

особенность научных исследований в ИФЗ – мультидисциплинарность. В этих работах использовались карты сейсмоактивных разломов, которые сами по себе представляли выдающийся научный результат в рамках чисто геоморфологической проблематики, они и поныне остаются непревзойденными по точности и детальности. Построенные геоморфологом, сотрудником ИФЗ академиком РАЕН Т.П. Белоусовым, эти карты позволили продемонстрировать, что пространственные распределения сейсмоактивных разломов на поверхности Земли подчинены мультифрактальной статистике<sup>1</sup>. Этот результат был получен в ИФЗ первым в мире. Сегодня он многократно повторен и подтвержден научными коллективами разных стран и используется при моделировании геофизических сред.

Природа, безусловно, едина, природные процессы взаимосвязаны и требуют комплексного изучения, а научные прорывы чаще всего осуществляются там, где темы исследований в смежных научных дисциплинах соприкасаются или пересекаются. В этом случае по-настоящему содержательный научный результат практически всегда превосходит по значимости ту практическую цель, ради которой он достигался. По сути это и есть признак фундаментального исследования. Сегодня мы знаем, что процесс разрушения горных пород является масштабно-инвариантным во всем масштабном диапазоне своего существования. Свою роль в этом сыграло и сотрудничество физиков и геоморфологов ИФЗ.

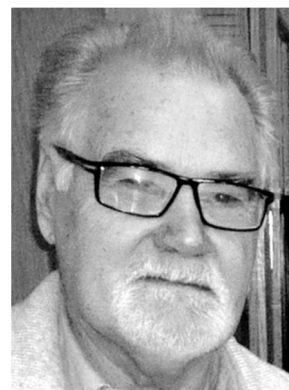
Исследования масштабной инвариантности процесса разрушения горных пород привели в систему огромный эмпирический материал, накопленный к тому времени в сейсмологии. Сейсмичность перестала восприниматься как автономный процесс, она оказалась лишь несколькими наиболее крупными масштабными уровнями единого масштабно-инвариантного процесса разрушения, а сейсмические структуры оказались примером открытых И.Р. Пригожиным диссипативных структур, возникающих в сложных системах при переходе в неравновесное состояние. Теоретические обобщения последовали в работах В.И. Кейлис-Борока, заведующего Отделом вычислительной геофизики ИФЗ (в 1987 г. В.И. Кейлис-Борок был избран действительным членом Академии наук СССР). Свою программную статью 1990 г., опубликованную на английском языке, В.И. Кейлис-Борок начинает с констатации структурообразующего фактора геосреды, отвергая модель среды как линейного континуума в пользу нелинейных моделей среды с самоподобной структурой:

«The lithosphere's major trait is so fundamental that it is easy to overlook: it is the hierarchical discreteness of its structure and dynamics».

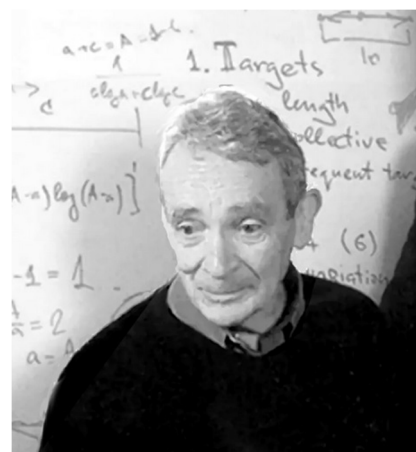
«Основное свойство литосферы имеет настолько фундаментальный характер, что оно легко обнаруживается: это иерархическая дискретность ее структуры и динамики»<sup>2</sup>.

В дальнейших работах В.И. Кейлис-Борока моделирование сейсмического процесса неоднократно осуществлялось с использованием модифицированных вариантов мультипликативных каскадов, изначально включающих в себя свойство масштабной инвариантности. В частности, им и его сотрудниками реализована каскадная модель сейсмичности, основанная на встречной динамике прямого и обратного каскадов<sup>3</sup>. В 1998 г. за выдающийся вклад в нелинейную геофизику академик В.И. Кейлис-Борок был награжден Европейским геофизическим обществом медалью Л.Ф. Ричардсона.

Однако в 1990 г. в результате очередной реорганизации ИФЗ Отдел вычислительной геофизики выделился в отдельный институт РАН. Академик В.И. Кейлис-Борок возглавил этот институт. Сегодня он называется Институтом теории прогноза землетрясений и математической геофизики, ИТПЗ РАН.



Томас Петрович Белоусов  
(1939–2016)



Владимир Исаакович Кейлис-Борок  
(1921–2013)

<sup>1</sup> Белоусов Т.П., Стаховский И.Р. Мультифрактальный анализ разломных кластеров зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня // Геофизические процессы в дискретной среде / Под ред. М.А. Садовского. М.: Изд-во РФФИ, 1993. С. 50–63.

<sup>2</sup> Keilis-Borok V.I. "The Lithosphere of the Earth as a Nonlinear System with Implications for Earthquake Prediction." *Reviews of Geophysics*. 28.1 (1990): 19–34.

<sup>3</sup> Zaliapin I., Keilis-Borok V., Ghil M. "A Boolean Delay Equation Model of Colliding Cascades. Part 1: Multiple Seismic Regimes." *J. Stat. Phys.* 111.3–4 (2003): 815–837; Idem. "A Boolean Delay Equation Model of Colliding Cascades. Part 2: Prediction of Critical Transitions." *J. Stat. Phys.* 111.3–4 (2003): 839–861.

Методы неравновесной физики преобразили современную сейсмологию. Она превратилась в сильно математизированную и компьютеризированную науку с чрезвычайно широким фронтом исследований. Возникающие в сейсмологии задачи постоянно выводят сейсмологов на передний край современной физики. Анализ сейсмических данных трансформировался в область применения самых современных физических и математических теорий. Сегодня можно говорить не только о том, что методы неравновесной физики обогащают теоретический аппарат сейсмологии, но и о том, что неравновесная физика сама впитывает в себя методы, разработанные для решения сейсмологических задач. Так, теория вейвлетного преобразования, изначально предназначавшаяся для анализа сейсмограмм, сегодня используется как метод исследования неравновесных (масштабно-инвариантных) систем любой физической природы. Классический закон Гутенберга-Рихтера оказался не чисто сейсмологическим законом, а законом, описывающим статистику катастрофических событий в любых неравновесных многокомпонентных (в том числе – природных) системах. Фактически к этому сводится содержание появившейся в 1988 г. концепции Self-Organized Criticality, прямо связавшей структурную организацию сильно неравновесных систем со степенной статистикой<sup>1</sup>. В свою очередь концепция Self-Organized Criticality изменила концептуальный подход к исследованию сейсмичности, которая теперь прочно ассоциируется с результатом самоорганизации материала литосферы вследствие тектонических воздействий.

Сейсмология становится современной передовой наукой. Вклад сотрудников ИФЗ в этот процесс трудно переоценить. Им принадлежат пионерские работы по исследованию масштабной инвариантности пространственных и временных распределений сейсмичности, а также пространственных распределений сейсмоактивных разломов. Ими построены новые статистические модели сейсмичности и выявлены новые статистические закономерности сейсмического процесса<sup>2</sup>. Разрабатываются новые методы мониторинга состояния сейсмогенерирующей среды. Наряду с методами фрактальной геометрии в физике очага землетрясения занимают место и методы теории катастроф<sup>3</sup>. Многие традиционные задачи сейсмологии – например, задачи оценки сейсмического риска или сейсмического районирования, – постепенно обретают содержательный теоретический аппарат.

Современная сейсмология – это наука о неравновесных и нелинейных процессах, происходящих во внутренних объемах литосферы<sup>4</sup>. И хотя некоторые актуальные задачи сейсмологии (прежде всего – задача сейсмического прогноза) пока относятся к числу нерешенных, теоретические подходы к их решению постепенно обнаруживаются в функциональном пространстве неравновесной и нелинейной физики. Сегодня сейсмология развивается вместе с ней.

### Заключение

Институт физики Земли сыграл значительную роль в становлении современной сейсмологии. Однако повествование будет неполным, если не упомянуть немаловажную деталь: исследования геофизических систем методами неравновесной физики никогда не входило в плановую тематику Института. Иными словами, перечисленные достижения сотрудников Института появились не благодаря какой-либо форме руководства их работой, а благодаря глубокому интересу работавших и работающих в ИФЗ исследователей к развиваемой ими научной проблематике и их приверженности фундаментальному характеру своих исследований. Фундаментальный характер исследований предполагает максимально широкий охват темы, пристальное внимание к малозначительным на первый взгляд деталям, использование всех существующих в мире методов исследования изучаемой проблемы. Это, разумеется, возможно только на основе широкой эрудиции, знакомства со всей имеющейся в мире литературой, посвященной исследуемому вопросу, независимо от языка, на котором она написана. И это возможно только при условии непрерывного систематического самообучения. Все это вместе и заключено в понятии фундаментальная научная школа. Новое научное знание появляется в результате искреннего интереса ученых к своей работе и обязательной творческой свободы.

Свое 90-летие Институт физики Земли встречает в сложное время административной реформы РАН, в ходе которой непрерывно возрастает роль сугубо бюрократических методов управления наукой. Целенаправленное сокращение творческой свободы научных сотрудников Академии наук оказывает самое негативное воздействие на результаты их научной работы. Все те качества советской, а

<sup>1</sup> Bak P., Tang C., Weiessenfeld K. "Self-Organized Criticality." *Phys. Rev. A* 38.1 (1988): 364–374; Bak P., Tang C. "Earthquakes as Self-Organized Criticality." *J. Geophys. Res.* 94.15 (1989): 635–637.

<sup>2</sup> Стаховский И.Р. Согласование скейлингов сейсмического и сейсмоэнергетического полей земной коры // *Физика Земли*. 2004. № 11. С. 38–46.

<sup>3</sup> Гульельми А.В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф // *УФН*. 2015. Т. 185. № 4. С. 415–429.

<sup>4</sup> И глубже: современной сейсмологией охватываются также глубинные землетрясения с очагами глубиной до 700 км. (*Прим. ред.*).



сегодня – российской академической науки, благодаря которым даже при смене парадигмы развития сейсмологии ИФЗ остался научной школой, органично вписавшейся в новое направление сейсмологических исследований и плодотворно развивающей это направление, сегодня подвергаются нелегкому испытанию. Ученые выходят на митинги, в правительство уходят протестные письма, подписанные сотнями академиков и членов-корреспондентов РАН, но убийственная реформа продолжается.

Хочется надеяться, что разрабатываемый сейчас новый Закон о науке нормализует ситуацию. Научная школа Института физики Земли, породившая множество научных направлений в геофизике и научных институтов для их исследования, была и остается уникальной, одной из самых заметных в мире. Она должна оставаться такой и в будущем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.М., Майер А.Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1967. 487 с.
2. Белоусов Т.П., Стаховский И.Р. Мультифрактальный анализ разломных кластеров зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня // Геофизические процессы в дискретной среде / Под ред. М.А. Садовского. М.: Изд-во РФФИ, 1993. С. 50–63.
3. Гульельми А.В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф // УФН. 2015. Т. 185. № 4. С. 415–429.
4. Молчанов С.А., Писаренко В.Ф., Резников Ф.Я. О перколяционном подходе в теории разрушения // Вычислительная сейсмология. 1986. № 19. С. 3–8.
5. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 414 с.
6. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3–18.
7. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
8. Стаховский И.Р. Согласование скейлингов сейсмического и сейсмозонергетического полей земной коры // Физика Земли. 2004. № 11. С. 38–46.
9. Bak P., Tang C. "Earthquakes as Self-Organized Criticality." *J. Geophys. Res.* 94.15 (1989): 635–637.
10. Bak P., Tang C., Weihsenfeld K. "Self-Organized Criticality." *Phys. Rev.* A38.1 (1988): 364–374.
11. Geilikman M.B., Golubeva T.V., Pisarenko V.F. "Multifractal Patterns of Seismicity." *Earth and Planetary Science Letters* 99.1–2 (1990): 127–132.
12. Kagan Y.Y. "Seismicity: Turbulence of Solids". *Nonlinear Science Today* 2 (1992): 8–18.
13. Kagan Y.Y., Knopoff L. "The Spatial Distribution of Earthquakes: the Two-Point Correlation Function." *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 62 (1980): 303–320.
14. Keilis-Borok V.I. "The Lithosphere of the Earth as a Nonlinear System with Implications for Earthquake Prediction." *Reviews of Geophysics*. 28.1 (1990): 19–34.
15. Kesten H. *Percolation Theory for Mathematicians*. Boston: Birkhauser, 1982. 300 p.
16. Kolmogorov A.N. "A Refinement of Previous Hypotheses Concerning the Local Structure of Turbulence in a Viscous Incompressible Fluid at High Reynolds Number." *J. Fluid Mech.* 13 (1962): 82–85.
17. Mandelbrot B. *Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W.H. Freeman, 1982. 468 p.
18. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems from Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. New York, London, Sydney, and Toronto: John Wiley & Sons, 1977. 400 p.
19. Obukhov A. "Some Specific Features of Atmospheric Turbulence." *J. Geophys. Res.* 67 (1962): 3011–3014.
20. Richardson L.F. "Atmospheric Diffusion (Shown on a Distance-neighbour Graph)." *Proc. Roy. Soc.* A214.756 (1926): 709–737.
21. Richter C.F. *Elementary Seismology*. San Francisco: W.H. Freeman and Co, 1958. 268 p.
22. Wilson K.G. "Problems in Physics with Many Scales of Length." *Sci. Am.* 241 (1979): 158–179.
23. Wilson K.G. "The Renormalization Group and Critical Phenomena." *Rev. Mod. Phys.* 55 (1983): 583–590.
24. Zaliapin I., Keilis-Borok V., Ghil M. "A Boolean Delay Equation Model of Colliding Cascades. Part 2: Prediction of Critical Transitions." *J. Stat. Phys.* 111.3–4 (2003): 839–861.
25. Zaliapin I., Keilis-Borok V., Ghil M. "A Boolean Delay Equation Model of Colliding Cascades. Part 1: Multiple Seismic Regimes." *J. Stat. Phys.* 111.3–4 (2003): 815–837.
26. Zeeman E.C. *Catastrophe Theory – Selected Papers 1972–1977*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977. 150 p.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Стаховский, И. Р. Методы неравновесной физики в современной сейсмологии: к юбилею Института физики Земли РАН / И.Р. Стаховский // *Пространство и Время*. — 2018. — № 1—2(31—32). — С. 181—189. DOI: 10.24411/2226-7271-2018-11064. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provgt\_st2\_3\_4-28\_29\_30.2017.64.