**За горизонтом предсказуемости**

Тигран Оганесян, Глеб Переходцев

До 60-х годов прошлого столетия считалось, что в природе есть всего два класса процессов. Первые описываются динамическими системами, где будущее однозначно определяется прошлым – процессы этого класса детерминированы, обратимы и полностью предсказуемы. Вторые же – случайные процессы, где будущее никак не зависит от прошлого. Однако уже к началу 70-х годов ученые с удивлением обнаружили, что существует третий, очень важный класс процессов, которые формально описываются динамическими системами, но их поведение может быть предсказано только на небольшой промежуток времени. Этот третий класс процессов получил название «динамического хаоса» (см. «Вездесущие неустойчивости», «Порядок и хаос», «Законы непредсказуемости»).

**Клубок расходящихся траекторий**

Пионерами в исследованиях динамических систем «третьего рода» были американский метеоролог Эдвард Лоренц и франко-американский математик Бенуа Мандельброт. В середине 60-х Лоренц задался вопросом: почему стремительное совершенствование компьютеров, математических моделей и вычислительных алгоритмов не привело к созданию достоверных среднесрочных прогнозов погоды? Лоренц предложил упрощенную модель процессов, происходящих в атмосфере, заметно упростив уравнение Навье-Стокса, описывающее поведение вязкой жидкости. Компьютерный анализ модели Лоренца привел к принципиальному результату: для «динамического хаоса» возможен весьма ограниченный горизонт прогноза.

С точки зрения математики любая динамическая система, что бы она ни моделировала, описывается движением точек в фазовом пространстве (координатами такого пространства служат степени свободы системы), вернее их траекториями, которые в классической динамике однозначно определены для сколь угодно большого промежутка времени. Но динамическому хаосу соответствует «клубок» расходящихся траекторий, причем от скорости их расходимости зависит интервал времени, на который может быть дан прогноз. Благодаря анализу модели Лоренца метеорологи были вынуждены признать, что их «пророческие способности» ограничены максимум тремя неделями и даже новейшие компьютерные погодные модели пока не в состоянии преодолеть этот барьер.

Бурно развивающаяся с середины прошлого века нелинейная динамика окончательно развеяла иллюзию «глобальной предсказуемости»: выяснилось, что начиная с какого-то горизонта прогноза мы в принципе не можем предсказать поведение многих даже достаточно простых систем. Однако нелинейная динамика дала исследователям помимо очередной демонстрации принципиальной ограниченности человеческого знания будущего достаточно мощный инструментарий для анализа разнообразных процессов с ограниченным горизонтом прогноза. Нелинейная динамика позволяет устанавливать, сколько переменных необходимо для их описания, сколько переменных нужно для прогнозирования, каким должен быть их мониторинг, т.е. пытается вычленить те элементы, которые оказывают определяющее воздействие на динамические процессы в подобных системах. Ученые принялись за разработку новых поколений моделей и алгоритмов, оперирующих массивами этих переменных, и прогностическая деятельность постепенно стала переходить из разряда любительской в профессиональную: быстрыми темпами пошло развитие «индустрии прогноза». В центре внимания прогнозистов сейчас прежде всего находятся описание и предсказание редких катастрофических событий не только в природе, но и в обществе.

**Тяжелые хвосты**

Философы и социологи часто называют современную цивилизацию «обществом риска». А в дальнейшем, с развитием научно-технического прогресса, повсеместным внедрением био-, инфо- и прочих неотехнологий, спектр рисков и возможные масштабы катастроф будут только увеличиваться. В этой связи все более актуальной становится задача управления рисками – прогнозирования и предупреждения всякого рода катаклизмов.

Связь между идеями нелинейной динамики и управлением рисками стала ясна недавно. Осознать ее помогла парадоксальная статистика техногенных катастроф. С помощью математического аппарата нелинейной динамики было показано, что все образчики «чудовищного невезения», сопутствующего прогрессирующему человечеству, вроде аварии на комбинате «Маяк», чернобыльского взрыва или гибели «Конкорда» зачастую подчиняются неким универсальным сценариям возникновения хаоса из упорядоченного состояния, т.е. представляют из себя вариации на тему вышеописанного третьего класса процессов с ограниченной предсказуемостью.

Еще в начале XIX века Карл Гаусс установил, что вероятность распределения случайных величин достаточно часто описывается одним и тем же математическим выражением, получившим позже его имя. Соответствующая распределению Гаусса кривая показывает, что большие отклонения от средних величин редки, ими можно пренебречь. Однако существует и множество других вероятностных распределений, в том числе степенные. «Хвосты» этих распределений убывают гораздо медленнее, за что они получили название «распределений с тяжелыми хвостами». В этом случае вероятности отклонений от средних величин уже существенно больше по сравнению с распределением Гаусса. Если бы человеческий рост был распределен по такому закону, мы бы жили в мире сказок братьев Гримм, регулярно сталкиваясь на улицах с великанами и карликами.

Еще в середине 30-х годов создатель знаменитой «шкалы землетрясений» Чарльз Рихтер высказал предположение, что именно «распределения с тяжелыми хвостами» ответственны за катастрофы. В дальнейшем теория риска установила, что этот закон распределения вероятностей имеет фундаментальный характер для процессов, подпадающих под категорию катастрофических. Сегодня исследователи сходятся во мнении, что степенные распределения «с тяжелыми хвостами» описывают не только природные, но и разнообразные техногенные катастрофы: аварии на атомных станциях и химических предприятиях, разрывы трубопроводов, неполадки в компьютерных сетях, более того, ими в значительной степени определяется развитие биосферы и поведение финансовых рынков. «Степенная» статистика существенно отличается от «нормальной» (это еще одно название Гауссового распределения). «Степенная» статистика описывает явления, при которых ущерб от одного самого крупного события может превосходить ущерб от всех остальных событий этого класса вместе взятых (см. «Информационное обеспечение технологических процессов»).

**Предвестники катастроф**

Ответ на вопрос, откуда берется степенная статистика, удалось получить благодаря новой парадигме нелинейной динамики – теории сложности и построенной в ее рамках теории самоорганизованной критичности.

Для всех степенных распределений общим является возникновение длинных цепочек причинно-следственных связей: одно событие может повлечь другое, третье и т.д., в результате чего происходит «лавинообразный» рост изменений, затрагивающих всю систему. Причем окончание «лавины изменений» – переход к новому состоянию равновесия – может произойти не скоро. Исследование сложных систем, демонстрирующих самоорганизованную критичность (т.е. все тех же систем, относящихся к классу процессов с ограниченным горизонтом прогноза), показало, что такие системы сами по себе стремятся к критическому состоянию, в котором возможны «лавины» любых масштабов. Поскольку к системам такого сорта относятся биосфера, общество, инфраструктуры различного типа, военно-промышленный комплекс, множество других иерархических систем, результаты теории самоорганизованной критичности очень важны для анализа управляющих воздействий, разработки методов прогнозирования и «упреждающей защиты» от этих явлений.

Именно на базе нелинейной динамики теория рисков выработала своеобразную технику работы с незнанием, направленную на поиски закономерностей поведения произвольной нелинейной системы как целого. Оказывается, компьютерный анализ большого массива статистических данных позволяет выявить так называемые «предвестники» катастроф. Даже незначительный рост этих медленно меняющихся величин, рассчитываемых по определенным сложным формулам, сигнализирует о надвигающейся опасности.

Одним из первых идею о подобном применении методов нелинейной динамики высказал более 20 лет назад Владимир Кейлис-Борок (ныне – академик РАН, директор Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики). Под его руководством был создан алгоритм прогноза, основанный на накопленных за многие годы данных сейсмической активности. Этот метод получил название М8, поскольку предназначался для прогноза достаточно сильных (более чем в 8 баллов) землетрясений. С 1985 года началось систематическое применение разработанного российскими учеными алгоритма. За это время было успешно предсказано пять из семи происшедших крупнейших землетрясений, в том числе Спитакское и Калифорнийское. Впрочем, «удачные» предсказания едва ли могут серьезно облегчить работу соответствующим «службам спасения»: точность данного метода крайне невелика – прогноз выдается с неопределенностью по времени в один – два года и с неопределенностью в пространстве в 200...400км. Не слишком успешно применение данного метода и к прогнозу землетрясений слабее 8 баллов. Но даже с учетом этих оговорок продемонстрированная алгоритмом M8 возможность предсказывать землетрясения за несколько лет до их наступления представляется серьезным научным достижением.

Более того, уже обкатанный на прогнозе природных катаклизмов алгоритм был применен Кейлис-Бороком с сотрудниками и в социально-экономической сфере. В рамках метода M8 анализировались экономические рецессии в США с 1963 года по 1997 год. За основу были взяты 9 ежемесячных характеристик экономики США – объем ВВП, суммарный личный доход граждан, уровень безработицы и др. Расчеты на базе этих данных позволяли определить так называемые промежутки тревоги – периоды времени, за которыми должны были последовать рецессии. И действительно, все пять рецессий, происходивших с 1963 года по 1997 год, предварялись периодами тревоги. В одном случае тревога длилась 13 месяцев, в другом – 10, а в оставшихся трех случаях – по 3 месяца. Правда, данное исследование было ретроспективным, и пока вопрос о будущих катаклизмах в американской экономике группа Кейлис-Борока не изучала.

**Лавины изменений**

Наиболее яркий пример взаимопроникновения точного естествознания и наук об обществе – возникшее в середине 90-х годов новое междисциплинарное направление, эконофизика. Официальной датой ее рождения считается 1997 год, когда в Будапеште была проведена первая «эконофизическая» конференция, а начиная с 1999 года Европейское физическое общество поставило организацию конференций «Применение физики в финансовом анализе» на поток – в декабре этого года в Лондоне состоится уже третья по счету «тусовка эконофизиков».

Многочисленные зарубежные адепты новомодной дисциплины (подавляющее их большинство по образованию – физики), вооружившись методами нелинейной динамики, сегодня активно вторгаются в заповедную зону экономической науки – в анализ и прогнозирование разнообразных финансовых потрясений (ибо, как мы уже отмечали, финансовые рынки, согласно представлениям нелинейной динамики, – всего лишь одна из вариаций третьего класса процессов, систем с ограниченной предсказуемостью). Характерный пример подобных попыток – недавние исследования группы Дэвида Лэмпера из Оксфордского университета.

Лэмпер создал модель, позволяющую, по его мнению, эффективно предсказывать финансовые катастрофы. Его модель базируется на анализе стандартной системы, состоящей из множества игроков, конкурирующих друг с другом за ограниченные ресурсы. «Всеобщая взаимозависимость» поведения игроков приводит к тому, что система в целом оказывается очень чувствительной к небольшим флуктуациям. И хотя подавляющее их большинство так и остается малозначимым для рынка, отдельные «мелочи» способны вызвать «лавины изменений». Декларируемая новизна подхода Лэмпера состоит в том, что ему якобы удалось «нащупать очаги будущей катастрофы» (те самые «предвестники», выявление которых – важнейшая задача «рискового прогнозирования») – ими оказались так называемые коридоры предсказуемости, внутри которых краткосрочные изменения параметров рынка с высокой степенью определенности соответствуют рациональным ожиданиям. Как ни странно, именно эти небольшие периоды «повышенной предсказуемости» поведения рынка зачастую предвещают последующие серьезные катаклизмы. С результатами его компьютерного моделирования вполне коррелирует и другое недавнее исследование флуктуаций финансовых рынков, проведенное Рикардо Мансиллой (Национальный университет Мехико). Мансилла также пришел к выводу, что непосредственно перед резкими изменениями на рынке возрастает предсказуемость.

Лавинообразный рост исследований, наблюдающийся в последние годы в сфере анализа и прогнозирования процессов с ограниченной предсказуемостью, безусловно, в значительной степени объясняется увеличением вычислительной мощи используемых при моделировании этих процессов компьютеров. Однако, по мнению ведущего отечественного специалиста в данной области, заместителя директора Института прикладной математики РАН профессора Георгия Малинецкого, оптимистические ожидания, типичные для нашего общества, связывающего слишком много надежд с компьютерными технологиями, пока явно опережают реальный прогресс в этой научной сфере: «Вначале предполагалось, что автоматизированные системы управления позволят резко повысить эффективность экономики. Но экономика оказалась не готова к этому. Большие надежды возлагались на вычислительный эксперимент, связанный с компьютерным решением различных уравнений. Но выяснилось, что для описания многих важных объектов у нас нет соответствующих уравнений, а если они и есть, то определение коэффициентов и настройка модели сами по себе представляют исключительно сложную задачу. Ахиллесовой пятой алгоритмов прогноза для социально-экономических систем и задач по управлению риском являются данные. Для того чтобы «научить» соответствующие компьютерные системы, нужно иметь длинные ряды достоверных и достаточно точных данных, характеризующих различные стороны изучаемого объекта. Пока этого практически нигде нет. Только восполнив этот пробел, можно существенно повысить качество прогноза». Так что пока попытка взаимного оплодотворения точного естествознания и наук об обществе (прежде всего экономики) сводится к констатации того, что гуманитариям необходимо накапливать длинные ряды эмпирических данных и учить нелинейную динамику.

**Список литературы**

Георгий Малинецкий, Сергей Курдюмов. Нелинейная динамика и проблемы прогноза. Доклад на заседании Президиума РАН.