

К сожалению, уже почти десяток лет взаимодействие исследователей, которые занимаются прогнозом, анализом и оценкой последствий аварий, бедствий и катастроф, с теми, кто, собственно, должен их предупреждать и парировать, развивается по одному и тому же сценарию. Вначале ученые выступают с какой-либо разумной, на их взгляд, идеей, обсуждают ее на конференциях, пишут бумаги и, наконец, убеждают соответствующие министерства, что этим действительно следует заниматься. [1,2,3,4,5] Потом слова ученых многократно повторяются как заклинание и, наконец, соответствующая тема оказывается в распоряжении отраслевой науки или в какой-либо академической программе. Работа должным образом не организовывается, до серьезного прогноза, организации мониторинга и создания центра, в котором должны работать эксперты, каковых можно экстренно привлечь в случае кризиса, дело не доходит, и предложенная работа не выполняется. Затем отраслевые институты рапортуют о выполнении всего намеченного, а идея оказывается дискредитированной, попадая в разряд тупиковых.

Одна из главных причин такого положения вещей – отсутствие критериев, по которым можно было бы судить, выполнена работа или нет, и своеобразное "выпадение" полученных результатов работы из контура обратной связи, который должен был бы обеспечивать управление научными исследованиями.

Этот путь, к сожалению, уже прошла идея управления рисками природных и техногенных катастроф [2]. Его завершает и концепция мониторинга и прогнозирования социальных нестабильностей [6]. В значительной мере дискредитированной оказалась программа оценки стратегических рисков России (опасностей, которые угрожают стране сейчас либо будут угрожать в обозримом будущем и которые могут изменить ее историческую траекторию) [7].

Цель этих заметок – обратить внимание на ту же участь, которая грозит научной программе, связанной с прогнозом бедствий и катастроф, а также кризисных явлений современной России, и проекту создания национальной системы научного мониторинга. [1]

Собственно, мы постараемся разбить статью на концептуальную и организационную часть, с одной стороны, и на часть, которая посвящена научной базе того и другого подхода.

ПОЧЕМУ У НАС НЕТ ПРОГНОЗА И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ?

На встрече с руководством РАН 03 декабря 2001 года Президент РФ выделил проблему независимой экспертизы государственных решений, прогноза и предупреждения бедствий и катастроф в природной и техногенной сфере, социальных нестабильностей как одну из двух ключевых задач, стоящих перед научным сообществом России. То есть, политические решения необходимые для создания национальной системы прогноза и предупреждения опасных явлений и процессов, были приняты.

С другой стороны, сложилась кооперация ряда исследовательских институтов, готовых взяться за решение этой проблемы [1]. Были выдвинуты концепции *стратегических рисков* и *анализа кризисов*, обоснована необходимость создания *национальной системы научного мониторинга*, позволяющей свести воедино необходимые информационные потоки, исследователей, имеющих описания опасных явлений и процессов, базы данных, модели и алгоритмы, и усилия структур, входящих в контур управления страной, которые имеют полномочия и ресурсы для предупреждения бедствий и катастроф [1]. Это направление исследований получило поддержку Президиума РАН как одно из важнейших [8].

Вместе с тем, несмотря на то, что прошло много времени с момента принятия политического решения, серьезная работа по его реализации, по существу, не началась. Конференция по прогнозу и мониторингу чрезвычайных ситуаций, проведенная в текущем году МЧС России, показала, что и здесь крупных качественных сдвигов за последний год не произошло. 13 ноября 2003 года Совет безопасности РФ и Президиум Государственного Совета РФ обсудили вопрос «О мерах по обеспечению защищенности критически важных для национальной безопасности объектов инфраструктуры и населения страны от угроз техногенного, природного характера и террористических проявлений». Ответственность за научное обеспечение этих задач была возложена на РАН и Минпромнауки. Было поручено также составить Государственную межведомственную комплексную программу. Казалось бы, лед тронулся. Но соответствующая комиссия РАН и Президиум РАН отклонили программу фундаментальных исследований, связанных с прогнозом бедствий, катастроф и кризисов. А порядка принятия Государственных межведомственных программ в нашем отечестве пока нет. Это значит, что сначала надо установить порядок принятия таких программ. Попытки, предпринимаемые в этом направлении в последние полгода, пока не привели к каким-либо результатам. Время уходит. И в этой жизненно важной для страны и нашего общества области исследователи недалеко продвинулись от положения, в котором находились в 2001 году.

Важное политическое решение так и не нашло своего практического воплощения. Тем более, что лесные пожары в Сибири, торфяные пожары, вызвавшие смог над Москвой, наводнение в Краснодарском крае, сели в районе Новороссийска, катастрофический сход ледника, выход терроризма в России на новый уровень ("Норд-Ост", взрыв в Московском метро и т.д.), показывают, что принятое президентом страны решение пока не утратило актуальности.

Основными причинами такого положения дел представляются следующие.

– *Ведомственность, отсутствие необходимых организационных институтов для решения комплексных проблем.* Поставленная Президентом России задача требует координации усилий нескольких ведомств. В то же время в соответствии с действующим законодательством координация работы нескольких министерств является прерогативой премьера или вице-премьера. Руководители этого уровня к решению поставленной задачи пока не привлечены. Тем

более, что до сих пор правительство не до конца сформировано, не ясна структура ряда министерств, агентств и служб и области их компетенции, и решение многих важных вопросов отложено до осени.

– *Неадекватность структуры управления задачам организации системы прогноза и предупреждения.* Из предыдущего ясно, что для решения конкретных организационных, технических, научных задач мы вынуждены привлекать руководителей политического уровня. Это означает, что в настоящее время у нас отсутствует необходимая организационная структура для решения этого круга проблем. Мы вынуждены постоянно просить помощи, поддержки и финансирования у тех инстанций, которые, вообще говоря, не способны и не должны заниматься текущими вопросами.

Поясним эту простую и важную мысль. Если полководец будет постоянно следить за снабжением отдельных подразделений, то он не только не сможет выполнять свои непосредственные обязанности по управлению армией в целом, но и дезорганизует работу тех уровней иерархии, которые он пытается подменить.

– *Недооценка необходимых для решения проблемы ресурсов.* В 1994 году на конференции в Йокогаме научным сообществом, занимающимся анализом кризисных событий, был взят курс на переход от ликвидации и смягчения последствий бедствий и катастроф к их прогнозу и предупреждению. На национальном уровне эта инициатива была в ряде развитых стран доведена до государственного аппарата и риск-менеджеров. В частности Билл Клинтон, будучи президентом США, поставил задачу прогноза, предупреждения и управления нестабильностями в природной, социальной и техногенной сфере в США и за их пределами, как одну из главных задач.

Этот же курс несколько позже был заявлен МЧС России. Оно также в качестве приоритета обозначило переход от ликвидации последствий уже произошедших бедствий и катастроф к их прогнозу и предупреждению. Был проведен ряд конференций, а в 1997 году была сформирована Федеральная целевая программа "Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2005 года", продолжающаяся и по настоящий день. К сожалению, как мы видим, ее эффективность невелика.

Например, в бюджете России на 2000 год на исследовательские работы в МЧС России было запланировано около 47 млн. рублей, а реально выделено немногим более 16 миллионов. К сожалению, результат этих исследований, которые были проведены, и эффективность их внедрения, по существу, не стали достоянием научного сообщества, занимающегося риском, не говоря уже об управленцах и лицах, вырабатывающих государственную стратегию. В последующие годы ситуация был примерно такой же. Этих средств, даже если бы все они были потрачены на исследования, связанные с прогнозом и предупреждением, очень мало. Адекватных целевых программ в настоящее время в РАН также нет. В условиях нынешнего системного кризиса, когда зачастую нельзя разделять природные, техногенные и социальные факторы и многие бедствия и

кризисы надо рассматривать в комплексе, такое положение вещей неприемлемо.

– *Отсутствие организационной проработки проблемы и места системы научного мониторинга, если таковая будет создана, в контуре управления страной.* Допустим, что необходимые исследования проведены, система разработана и развернута. Достаточно ли этого для того, чтобы она сделала жизнь граждан более безопасной, а развитие экономики более устойчивым относительно природных и техногенных катастроф? Разумеется, нет.

Потому что должно быть определено, кем и как будут использоваться результаты прогнозов и оценки рисков в системе государственного управления, как будет налажено взаимодействие системы, экспертов, которые ее используют, с лицами, принимающими решения. Естественно, чтобы система научного мониторинга была бы непосредственно связана с Советом безопасности РФ, Администрацией президента РФ или представляла собой самостоятельный орган при Президенте. Последнее принципиально важно, поскольку при ее успешной работе главным результатом должен стать анализ стратегических рисков, угроз и опасностей, возникающих при принятии неадекватных решений или при неудачах в их реализации, определение коридора возможностей страны.

Есть и другой путь, по которому пошли США после террористических актов 11 сентября 2001 года – интеграция различных систем мониторинга и аналитических структур в целях координации усилий по обеспечению безопасности.

– *Нерешенность проблемы "приватизации информации".* В настоящее время массив информации, необходимой для прогноза и предупреждения бедствий и катастроф, оказался рассредоточен по многим организациям, относящимся к разным ведомствам. Типичным является желание многих государственных структур торговать информацией, утрата административных рычагов влияния в этой сфере. Нерешенность этой проблемы, естественно, будет уменьшать возможности систем мониторинга, прогноза и предупреждения, в основе которых лежит комплексный анализ всей доступной информации.

Логично было бы изменить саму постановку проблемы. Владельцы информации должны нести ответственность за отсутствие эффективных прогнозов в их области компетенции. Пока они не будут кровно заинтересованы в создании системы прогноза, никакими усилиями со стороны исследователей такая система не может быть создана. Здесь ситуация такая же, как в области страхования – владелец ресурсов должен нести ответственность за их разумное использование и за связанные с ними риски.

– *Отсутствие адекватной правовой базы в области прогноза и предупреждения.* В значительной мере широкий круг проблем, связанных с выработкой прогноза, организацией мониторинга, компьютерным моделированием и системным анализом опасных явлений и процессов оказался вне правового поля. В частности, практически не регламентирована процедура использования результатов прогноза. Бедствия последних лет помогли выявить множество

пробелов в действующем российском законодательстве и упущений в практике его использования.

В правовом регулировании в этой важной области заинтересовано общество в целом, но до сих пор не ясно, кто же в его интересах это будет делать. По-видимому, каждая ответственная политическая сила должна была бы предпринимать усилия в этом направлении. Однако, вероятно, это пока не понято и не делается. Заметим, что прогноз, риски и будущее должны быть заботой не только политиков, но и всей системы управления, объектом внимания всего общественного сознания. Если мы всерьез относимся к концепции устойчивого развития, которая провозглашена национальной концепцией России, то должны осознавать, что устойчивое развитие – это развитие с минимумом бедствий и катастроф и механизмами смягчения различных кризисных явлений. Но все это требует включения в контуры управления результатов мониторинга и прогноза, а это невозможно без соответствующего правового регулирования.

Таким образом, оказались не выполнены многие необходимые условия для построения системы научного мониторинга и создания структур, обеспечивающих анализ стратегических рисков.

Есть два пути. Первый – добиться выполнения этих условий и только после этого приступить к серьезным научным исследованиям, разработке программно-аппаратных комплексов, организации информационных потоков. Второй – делать это не "последовательно", а "параллельно", занимаясь одновременно и реализацией этого крайне важного для страны проекта, и адаптируя под него системное окружение.

Крайняя острота проблем, стоящих в этой области перед Россией, уже имеющийся потенциал и сложившаяся кооперация разработчиков, отечественный опыт реализации таких крупных проектов делают предпочтительным второй путь.

ПРОБЛЕМА СУБЪЕКТА

Зададим себе основой, с точки зрения организации прогноза и мониторинга, вопрос: кому, собственно, это нужно? Кто является субъектом, заинтересованным в обеспечении наблюдаемости опасных процессов и кризисов современной России, и есть ли он вообще?

Субъект существует ровно в той степени, в какой он имеет четко выраженные цели. Рассказывают, что одно время пожарным Нью-Йорка платили за количество потушенных пожаров, и город непрерывно горел. Потом им стали платить за спокойствие, и пожаров стало существенно меньше. Как только субъектом, нуждающимся в пожарной охране, стал город, а не сама пожарная охрана, эффективность ее работы заметно возросла.

Иными словами, принципиальное значение имеет то, стремятся ли люди, парирующие опасности, к тому, чтобы в них нуждались как можно чаще или как можно реже. Под их устремления неизбежно будет подстраиваться и система мониторинга. Она либо будет снабжать их информацией о том, как предот-

вратить опасность, либо рапортовать об их успехах на ниве ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. В последнем случае какая-либо научная проработка совершенно не обязательна.

Наряду с целеполаганием субъект управления должен добиваться и достижения поставленных задач. К сожалению, у нас проблемы и с той, и с другой ипостасью власти. В настоящее время не сформулированы ни национальная стратегия, ни стратегии в отдельных сферах жизнедеятельности. Следует признать, что в настоящее время субъект также в значительной степени отсутствует.

В самом деле, по данным экспертов из Администрации Президента РФ, выполняется в настоящее время не более 5% решений, принимаемых Президентом. По данным американских специалистов, эта цифра не превышает 2%. Естественно, в этом случае трудно говорить и об управляемости, и о политической воле, и о самой возможности предвидеть и предупредить бедствия и катастрофы. К сожалению, также ситуация повторяется и на других иерархических уровнях. В частности, субъектом в сфере, касающейся организации исследований по этой тематике, не является в настоящее время Российская академия наук. С другой стороны, она не является и исполнителем в том, что касается прогнозов и выработки рекомендаций. Сейчас она не может ни организовать работу как единая организация, ни дать экспертное заключение по какому-либо проекту, ни дать прогноз, касающийся развития тех или иных процессов, как часть государственной структуры.

Формирование стратегии требует определенной организации общества и возможностей самоорганизации на основе осознания собственных интересов и готовности их защищать. Как показывают социологические исследования, эти процессы в современной России идут крайне медленно. Большинство граждан не доверяет всем существующим социальным институтам и только в последние годы исключением стал Президент РФ. Поэтому, вероятно, требуется некоторый аналог стратегии, который мог бы играть организующую роль в течение переходного периода. Очевидно, он должен строиться таким образом, чтобы к тому времени, когда общество будет готово сформулировать и принять национальную стратегию, в его распоряжении были бы необходимые инструменты для решения ключевых задач. Одним из них является национальная система прогноза и мониторинга.

Однако в настоящее время ситуация существенно меняется. С одной стороны, резко возросла централизация государственной власти, все властные ресурсы сосредоточены в руках Президента, и ответственность за принятие и реализацию решений лежит на нем. Кроме того, знаковые катастрофы последних лет, о неизбежности которых предупреждали ученые, волна террористических актов, кризис инфраструктуры привели к представлению о существовании общенациональных интересах в области рисков, бедствий и катастроф. [1,2] Поэтому нельзя исключать, что субъект, осознающий необходимость серьезного научного подхода к прогнозу бедствий и катастроф и обладающей властью и

ресурсами, достаточными для их предупреждения и ликвидации, в ближайшее время появится.

В этом случае, естественно, его место в структуре власти должно быть четко очерчено. В сущности, речь идет об институте во многом аналогичном по своим функциям генеральному штабу в системе военного управления. Во-первых, такая структура – в идеале – представляет собой аппарат, преследующий не собственные интересы, а осуществляющий поддержку государственной структуры более высокого уровня. Во-вторых, здесь также речь идет о наличии больших, достоверных, постоянно собираемых и корректируемых информационных потоков, об их обобщении и осмыслении. В-третьих, в обоих случаях принципиальное значение имеет не прогноз сам по себе, а выработка на его основе рекомендаций, конкретных планов действий, которые отрабатываются задолго до возникновения чрезвычайных ситуаций. И, наконец, в-четвертых, в современном мире ущерб от природных и техногенных катастроф и социальных нестабильностей уже стал сопоставим с ущербом от военных действий.

КАКОЙ ДОЛЖНА БЫЛА БЫ БЫТЬ ПРОГРАММА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ НАУЧНОГО МОНИТОРИНГА

Предположим, что организационные, финансовые и иные проблемы, связанные с межведомственной программой, создать которую поручил Президент, уже решены. Обсудим, какой же должны быть эта программа.

Главной ее целью является обеспечение наблюдаемости ряда опасных явлений и процессов, а также кризисов современной России. Наблюдаемость, обеспечиваемая системами мониторинга, прогноза и поддержки принятия решений, позволит предупреждать и эффективно парировать большой круг опасностей и угроз. Это повысит эффективность государственного управления и даст возможность сберечь жизни многих тысяч людей и избежать больших материальных потерь. Мировой опыт показывает, что средства, вложенные в прогноз и предупреждение, позволяют избежать в 10÷100 раз больших расходов, которые потребовала бы ликвидация или смягчение последствий уже произошедших бедствий и катастроф.

Специальная межведомственная научная программа не имеет аналогов среди Федеральных целевых программ, научных программ президиума РАН, а также научных программ отделений Российской академии наук. Она принципиально отличается от выполнявшейся с 1985 г. (после Чернобыльской аварии) Государственной научно-технической программы "Безопасность" и от выполняемой в настоящее время Федеральной целевой программы по снижению рисков. Подчеркнем эти принципиальные отличия.

Стратегический характер программы. Эта программа рассматривает те угрозы, опасности и риски, которые могут существенно или кардинально изменить траекторию развития России. В 2001 г. группой исследователей из институтов РАН была выдвинута концепция *стратегических рисков* [1,7]. Смысл

этой концепции – постановка ряда задач, связанных с оценкой выполнимости стратегических решений, принимаемых на государственном уровне, а также оценкой возможных ущербов, связанных с невыполнением этих решений или с последствиями, к которым эти решения могут привести. В Российской академии наук есть опыт работы с проблемами такого масштаба. Системный анализ и компьютерное моделирование крупных государственных программ в военной области и в области освоения космоса позволили в свое время решить задачи первостепенной важности. И "цена вопросов", которым посвящена настоящая программа, является необычно высокой. Это диктует и привлечение многих ведущих исполнителей, работающих в этой области в России, и высокую ответственность, и необходимость тесного взаимодействия разработчиков программы с лицами, принимающими решения.

Стратегический прогноз как основа для выполнения программы. Оценка стратегических рисков, которая является главной целью программы, неотделима от стратегического прогноза, от долгосрочных ориентиров, от оценки коридора возможностей страны, от тех ключевых задач, которые сейчас стоят перед российским обществом. В частности, это связано с тем, что от сценария развития страны, от выбранного долговременного курса, принципиально зависит величина приемлемых и неприемлемых рисков и ущербов, а также объем ресурсов, которые могут быть выделены на парирование опасностей, предупреждение угроз или ликвидацию последствий уже происшедших катастроф. В отличие от США, Японии и ряда других развитых стран, в России в настоящее время нет крупных научных программ, затрагивающих этот круг проблем. Это наглядно показала подготовка национального доклада в 2002 г. на саммит в Йоханнесбурге по устойчивому развитию. Сама национальная концепция устойчивого развития неразрывно связана со стратегическим прогнозом и оценкой ряда стратегических рисков [3,6]. Научные программы большинства ведомств отрабатывают вопросы, связанные с реализацией выбранного варианта политики, в то время как стратегические проблемы естественно анализировать силами ученых РАН.

Междисциплинарный характер программы. Оценка многих опасностей и угроз невозможна в рамках одного интервала пространственных и временных масштабов, одной научной дисциплины, одного министерства или научного подхода. Для повышения уровня государственного управления необходим комплексный системный анализ возможных угроз, с которыми в настоящее время сталкивается Россия и с которыми она может столкнуться в обозримом будущем. Одним из результатов программы должен стать список приоритетов различных опасностей и сопоставление масштабов различных угроз. Поэтому ведомственный, узкодисциплинарный анализ неприемлем при выполнении настоящей научной программы. Этим предопределяется гораздо более тесное систематическое взаимодействие участников программы и необходимость постоянной коррекции методик анализа, прогноза, настроек предсказывающих систем.

Системный характер программы. Результатом работы исследователей должна быть, в первую очередь, не куча отчетов, докладов и научных публика-

ций, а работающая *система научного мониторинга*, позволяющая оценивать наиболее важные кризисные явления в развитии страны, динамику многих опасных явлений и процессов в различных сферах. Это определяет принципиальное значение системной интеграции, широкое использование новых информационных технологий и использование общих банков данных, знаний, информационных потоков, что стало возможным благодаря созданной телекоммуникационной инфраструктуре РАН. Все это предопределяет большое значение алгоритмов прогноза, методик анализа информационных потоков, компьютерных моделей и прогнозирующих компьютерных систем. Более двадцати лет назад академик Ю.А. Израэль предлагал создать систему такого типа, имея в виду более узкий круг опасностей, однако в те времена ситуация не была столь острой, необходимых инфраструктурных предпосылок создано не было, и организационные трудности преодолеть не удалось. В настоящее время создание системы научного мониторинга стало жизненной необходимостью, поэтому и научный, и организационный потенциал, имеющейся прежде всего в Академии, должен быть использован в полной мере. Отметим, что уже имеющиеся в РАН телекоммуникационные и вычислительные возможности создают необходимую технологическую базу для такой работы.

Открытый характер программы. В нынешней кризисной, быстро меняющейся ситуации прогноз желателен в возможно короткие сроки. Поэтому в рамках специальной программы должна быть предусмотрена возможность гибкого изменения структуры программы, приоритетов и привлечения ряда исполнителей, первоначально не участвовавших в этой работе. Традиционный "годовой цикл" развития научных программ является слишком длинным для того, чтобы адекватно реагировать на многие возникающие проблемы, хотя ряд других задач требует длительной системной работы, не ограничивающейся ни годом, ни пятью.

Важное значение гуманитарной компоненты программы. В соответствии с принятой во многих международных организациях, развитой в ряде стран практикой и указаниями Президента РФ, желательно отражение результатов принимаемых решений, возникающих угроз и опасностей на жизнь конкретного человека, отдельных социальных групп, этносов, регионов. Поэтому принципиальным становится человеческое измерение этой программы. Основное внимание в ней может быть уделено не определенным социальным, производственным или иным технологиями (таким как вооруженная борьба и терроризм), а глубоким системным факторам, предопределяющим использование тех или иных технологий – межцивилизационному взаимодействию, неравномерности социально-экономической динамики различных регионов, кризисам в развитии мира России и других цивилизаций.

Конкретность программы. Одним из принципиальных элементов, от которых зависит успех выполнения программы, является использование получаемых научных результатов в контуре управления страной, тесное взаимодействие исследователей с лицами, принимающими решения, заинтересованными министерствами и ведомствами. Одним из объектов анализа исследователей

должны стать механизмы использования результатов для обеспечения устойчивости развития России, повышения защищенности ее населения, техносферы и биосферы. Кроме того, значительное внимание должно быть уделено конкретным мерам, позволяющим на различных уровнях парировать возникающие опасности и угрозы.

Научная программа как элемент развития системы. Реализация настоящей научной программы является первым этапом в выполнении крупного системного проекта, направленного на обеспечение наблюдаемости и управляемости страной. Поэтому в случае успеха программы ее результаты должны быть востребованы и использованы широким кругом государственных органов. Аналогичная работа должна начаться в ряде государственных органов, а оценка риска – стать необходимым элементом управленческой деятельности. Можно ожидать, что успех выполнения программы приведет к созданию ряда крупных экспертных организаций, обслуживающих Правительство и крупнейшие российские предприятия.

В частности, аналогичная работа, начатая более 70 лет назад в США, привела к созданию корпорации RAND, с прогнозами и разработками которой ряд государственных деятелей США связывают ключевые успехи американской стратегии последних десятилетий (в состав корпорации RAND в настоящее время входит более 5 тыс. экспертов высокой квалификации, большинство из которых являются ведущими в своих областях знаний). В дополнение к корпорации RAND был создан Институт сложности в Санта-Фе, ориентированный на этот круг проблем, и Центр нелинейных исследований в Лос-Аламосе, позволяющие анализировать происходящие в мире изменения, оценивать их возможные результаты и находить способы влиять на различные процессы в желаемом направлении. На первом этапе цели нашей специализированной научной программы являются более скромными и узкими – оценить наиболее важные угрозы, риски и кризисы и найти средства для их парирования, а также создать структуру, организации которые могли бы постоянно заниматься мониторингом и прогнозом, опираясь на современные научные достижения, и были бы включены в контур управления страной.

Специализированная программа – инструмент реализации потенциала Академии. Очень часто от Академии наук ждут решения задач, связанных с восстановлением цикла воспроизводства инноваций, созданием оружия следующих поколений, технологическим перевооружением российской экономики. К сожалению, в настоящее время Академия наук не может сыграть принципиальной роли в этих областях. Однако оценка рисков, угроз, перспектив развития, выбор приоритетов и поиск новых возможностей, которые предусматривает настоящая программа, являются одним из наиболее эффективных инструментов для того, чтобы имеющийся потенциал Академии мог быть задействован не в дальней перспективе, а в ближайшее время. Поэтому естественно в наибольшей мере опираться на уже имеющиеся в Академии заделы.

Важной в этом контексте представляется мысль академика Ж.И. Алфорова, что недофинансирование науки суть необходимое условие для

ее уничтожения, но не достаточное. А достаточное – неиспользование ее результатов. Поэтому задача прогноза и анализа рисков могли бы сейчас стать сверхзадачей Академии. Работа над ней будет способствовать возрождению как научной среды, так и системы высшей школы, которая призвана готовить научные кадры. Заметим, что наука и образование – это то немногое, что мы еще сохранили от сверхдержавы. Другими словами, речь идет о решении не прикладной, а системной проблемы. Здесь уместна аналогия с государственным заказом в производстве, который при правильной организации может стимулировать значительную часть экономики, целые воспроизводственные контуры.

От успеха программы сейчас зависит и благополучие граждан России, и судьба самой Академии.

НАУЧНАЯ ОСНОВА МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ БЕДСТВИЙ, КАТАСТРОФ И КРИЗИСОВ

Традиционно изучением бедствий, катастроф и кризисов различной природы, их причин и последствий занимается целый ряд научных дисциплин, каждая – со своими собственными подходами и видением проблемы. Такого рода "феодалная раздробленность" пагубно сказывается на общем состоянии дел. Очевидно, что выработка и принятие общих решений возможны только на основе единых научных представлений о риске, единых способов представления информации.

Основой единого подхода к родственным задачам из разных областей знания может стать синергетика, зарекомендовавшая себя в качестве эффективного междисциплинарного подхода [6,8,9]. В ее основе лежит представление о наличии универсальных закономерностей поведения сложных систем. Обратим в этой связи внимание на основные универсальные свойства катастрофичности.

Универсальный язык описания бедствий и катастроф

Статистическим образом катастрофического поведения являются *степенные законы распределения*. Они имеют плотность вероятности вида

$$u(x) \sim x^{-(1+\alpha)},$$

где $\alpha \sim 1$.

Такие распределения называют также *распределениями с тяжелыми хвостами*. Хвост распределения отвечает за вероятность гигантских, из ряда выходящих событий. Их можно не принимать в расчет, если плотность вероятности убывает достаточно быстро. Пример такого убывания дают экспоненциальное и нормальное распределения (см. рис. 1). Однако в системах, описываемых степенными распределениями, катастрофические события случаются недостаточно редко для того, чтобы их возможностью можно было пренебречь (рис. 1). Иными словами, в случае степенной статистики оказывается неприменимым представление о гипотетической, т.е. лишь умозрительно возможной,

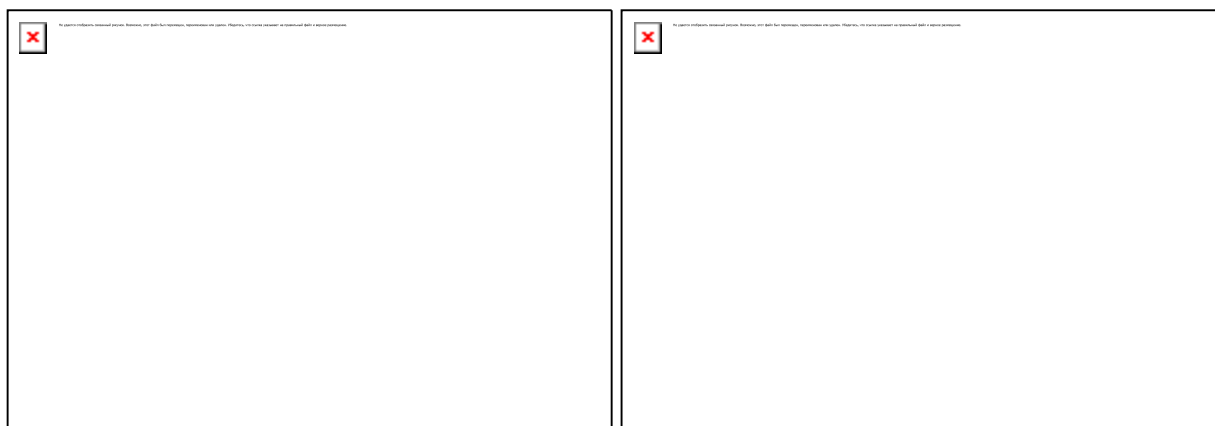


Рис. 1. Типичный вид плотности вероятности величин, распределенных в соответствии со степенным, экспоненциальным и нормальным законами

Левый рисунок позволяет сравнить скорость спада плотности вероятности для хвостов распределений.

На правом рисунке плотности распределений представлены в двойном логарифмическом масштабе. Линейный вид графика (1) свидетельствует о масштабной инвариантности систем, описываемых степенными распределениями.

аварии. Реально возможны любые аварии, даже самые крупные – такие, которые проектировщики не берут в расчет.

При статистическом анализе катастрофических событий на практике вместо плотности вероятности $u(x)$ удобнее рассматривать зависимость между размером (величиной) события x и его *рангом* r – номером события в списке, упорядоченном по убыванию x . Для степенных распределений *зависимость ранг–размер* также имеет степенной вид

$$r(x) \sim x^{-1/\alpha}.$$

На рис. 2 приведены примеры степенных зависимостей ранг–размер для техногенных катастроф и природных бедствий. Однако степенная статистика присуща отнюдь не только традиционным видам катастроф. Так, рис. 3 демонстриру-

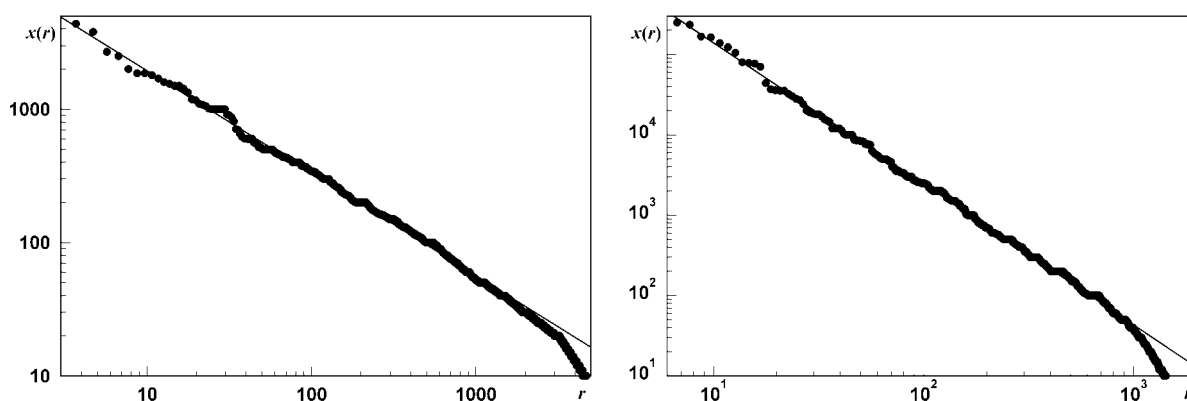


Рис. 2. Степенная статистика катастроф и бедствий [10]

Слева – ранжировка техногенных катастроф по количеству погибших (2047 крупнейших событий описываются степенной зависимостью с $\alpha = 1,30$).

Справа – ранжировка стихийных бедствий по числу раненых (1084 события, $\alpha = 0,57$).

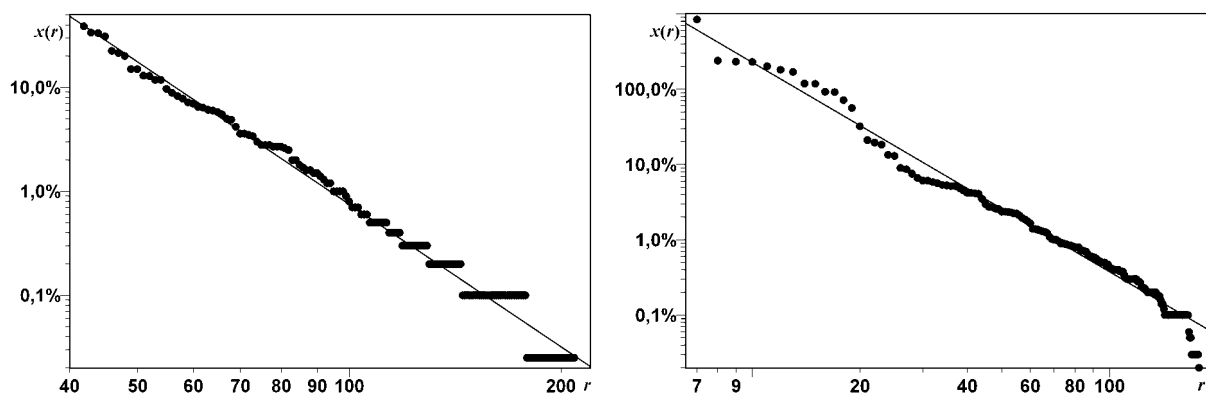


Рис. 3. Степенная статистика поражения вирусами

Слева – ранжировка стран по доле ВИЧ-инфицированного населения в возрастах от 15 до 49 лет. Степенной зависимостью с $\alpha = 0,17$ описываются все 164 страны, по которым имеются данные по состоянию на конец 2001 г. [11].

Справа – ранжировка семейств компьютерных вирусов по интегральной (просуммированной по всему времени наблюдения) доле пораженных ими компьютеров. Степенной зависимостью с $\alpha = 0,36$ описывается 160 наиболее распространенных семейства вирусов по ежемесячным рейтингам Лаборатории Касперского [12] с сентября 2001 г. по июль 2004 г.

ет аналогичную статистику для заболеваемости СПИДом и распространенности компьютерных вирусов.

Опасность явления, подчиняющегося степенному распределению, определяется его показателем: чем меньше α , тем опасней явление. Можно провести условное разграничение явлений на "аварии", характеризующиеся величиной $\alpha > 1$, и "катастрофы", для которых $\alpha < 1$. Влияние даже самых крупных "аварий" на суммарный ущерб от них ничтожно, т.к. он складывается из многочисленных умеренных событий. Однако в случае "катастроф" суммарный ущерб от ряда событий соизмерим по величине с крупнейшим из них.

Таким образом, для статистики катастроф ($\alpha < 1$) неприменим закон больших чисел, т.е. выборочное среднее неограниченно возрастает по мере увеличения объема выборки, не стремясь ни к какому конечному пределу. Соответственно, накопленный ущерб возрастает при увеличении объема выборки быстрее, чем линейно, т.е. с ускорением (см. рис. 4).

Максимальный ущерб также неограниченно возрастает со временем, что может ошибочно восприниматься как свидетельство нестационарности процесса, порождая ложное впечатление

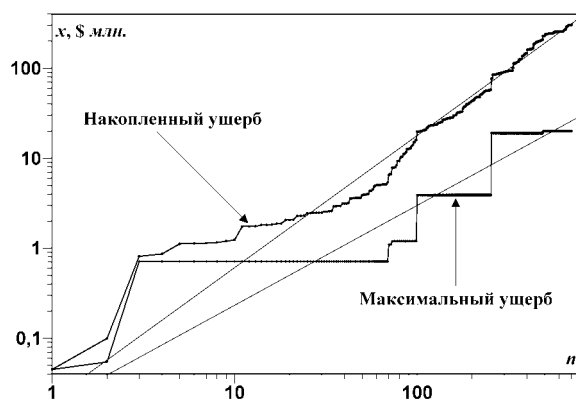


Рис. 4. Максимальный и накопленный ущерб от наводнений

Зависимость ущерба от номера события в каталоге [10] (в хронологическом порядке, начиная с 1975 г.).

Угловые коэффициенты степенных приближений (показаны тонкими прямыми линиями) составляют 1,10 для максимального ущерба и 1,47 – для накопленного.

ние, что дела идут все хуже и хуже, даже если они все время обстоят одинаково плохо. При этом смещаются критерии, по которым можно было бы выявить ситуации, когда дела действительно начинают идти все хуже и хуже, как это происходит ныне в нашем отечестве.

Анализ явлений, для которых характерны степенные законы распределения вероятностей, требует использования специальных, нетрадиционных методов статистического анализа. Ряд таковых к настоящему времени уже создан [2,13,14,15,16].

Универсальные механизмы возникновения и развития катастрофических событий

Системы, склонные к катастрофам, являются *сложными* в том смысле, что не могут быть сведены к простой сумме составляющих их частей. В противном случае события возникали бы как сумма большого числа независимых слагаемых, которая, в соответствии с центральной предельной теоремой, нормально распределена.

Другим следствием степенной статистики является *масштабная инвариантность* рассматриваемых систем, означающая, что происходящие в них процессы устроены одинаково на разных масштабах. Соответственно, невозможным оказывается и разложение их поведения на набор независимых подпроцессов, необходимо целостное описание.

Целостные, масштабно инвариантные свойства наблюдаются у систем, находящихся в т.н. *критическом состоянии*, пример которого дают фазовые переходы II рода. Оно может возникать

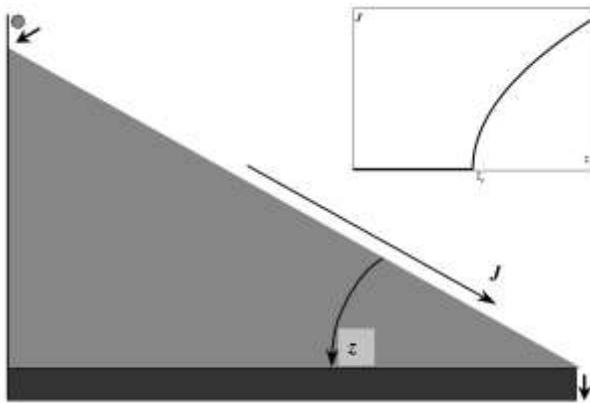


Рис. 5. Уголок с песком

либо благодаря тонкой искусственной подстройке, либо в процессе *самоорганизации* некоторых нелинейных систем, находящихся вдали от положения равновесия. Механизм самоорганизации в критическое состояние очень прост и универсален, что обуславливает исключительно широкую распространенность *самоорганизованно критических* явлений в природе.

Базовой моделью теории самоорганизованной критичности является *куча песка* [17,18,19,20]. Рассмотрим уголок с песком, изображенный на рис. 5. Если средний наклон поверхности z невелик, то песок неподвижен. Если же наклон превышает критическое значение z_c , возникает спонтанный ток песка

либо благодаря тонкой искусственной подстройке, либо в процессе *самоорганизации* некоторых нелинейных систем, находящихся вдали от положения равновесия. Механизм самоорганизации в критическое состояние очень прост и универсален, что обуславливает исключительно широкую распространенность *самоорганизованно критических* явлений в природе.

При токе $J = +0$ система самоорганизуется в состояние с критическим наклоном $z = z_c$.

Если средний наклон поверхности z невелик, то песок неподвижен. Если же наклон превышает критическое значение z_c , возникает спонтанный ток песка

J по поверхности (см. врезку на рис. 5). Оба эти состояния соответствуют некатастрофическому поведению. В докритическом состоянии $z < z_c$ ничего не происходит, а в надкритическом состоянии $z > z_c$ не происходит ничего неожиданного. Крупные неожиданные события, каковыми и являются катастрофы, возможны только в критической точке $z = z_c$, где спонтанного тока еще нет, но любая флуктуация может вызвать сход сколь угодно большой лавины.

Куча песка может быть помещена в критическое состояние либо путем ручной подстройки *управляющего параметра* в значение $z = z_c$, либо в результате самоорганизации при установке *параметра порядка* в значение $J = +0$. Чтобы обеспечить возможность такой самоорганизации, будем рассматривать динамику по шагам, добавлять песчинки по одной на вершину кучи (см. рис. 5) и дожидаться завершения процесса релаксации. При этом ток песка, очевидно, имеет минимально возможное значение – в среднем одна песчинка за один шаг рассмотрения.

Если наклон поверхности мал, то лавина, вызванная добавленной песчинкой, скорее всего, не достигнет края кучи и наклон станет увеличиваться. При очень большом наклоне состояние кучи является метастабильным, т.е. на любое возмущение она ответит глобальным событием, в результате которого большое количества песка покинет систему и наклон уменьшится.

Таким образом, имеет место отрицательная обратная связь, вынуждающая наклон принять значение $z = z_c$, при котором возмущение может распространяться по системе сколь угодно далеко. А это означает, что, несмотря на локальность взаимодействия песчинок, куча песка ведет себя как единое целое.

Самоорганизованно критическое поведение рассмотренной системы может быть описано с помощью простого клеточного автомата [21]. Сопоставим куче двумерную гексагональную решетку, в ячейках которой расположены целые числа, характеризующие *локальный наклон* поверхности (см. рис. 6). Если число превышает единицу, ячейка объявляется неустойчивой и *осыпается*, что выражается в уменьшении на 2 стоящего в ней числа с одновременным увеличением на 1 значений в двух ячейках, примыкающих к данной снизу (рис. 6). Горизонтальные *слои* решетки условно соответствуют линиям уровня поверхности, поэтому осыпание ячейки можно рассматривать как соскальзывание двух песчинок вниз по склону.

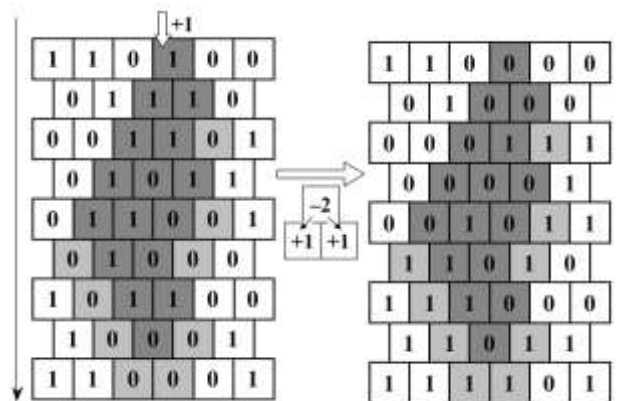


Рис. 6. Клеточный автомат для кучи песка

Устойчивыми считаются ячейки с нулевым или единичным наклоном. При потере ячейкой устойчивости из нее изымаются две песчинки и передаются в пару нижележащих ячеек. Лавина инициируется добавлением одной песчинки в случайно выбранную ячейку верхнего слоя.

Слева приведено состояние системы до лавины осыпаний, справа – после. Заливкой показаны область лавины и ячейки на ее границе, которые, получив песчинку, сохранили устойчивость.

Шаг моделирования состоит из *возмущения* и *релаксации*. Возмущение устойчивого состояния производится путем увеличения на единицу значения случайно выбранной ячейки верхнего слоя, что соответствует добавлению одной песчинки на вершину кучи. Если в результате возмущения ячейка теряет устойчивость, то она осыпается и начинается процесс релаксации. Осыпание ячейки приводит к увеличению наклона в нижележащих ячейках, что, в свою очередь, способно нарушить их устойчивость и т.д. по принципу цепной реакции. Таким образом, потеря устойчивости одной ячейкой может вызвать *лаvinу осыпаний* (рис. 6), продолжающуюся до тех пор, пока все ячейки вновь не обретут устойчивость.

После этого релаксационный процесс считается завершенным и начинается следующий шаг моделирования.

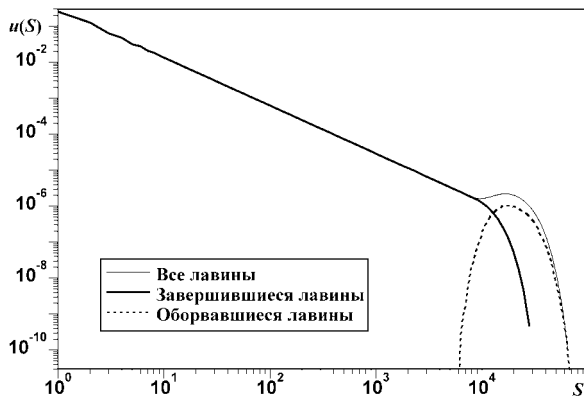


Рис. 7. Распределение лавин по площади для кучи песка с решеткой размером 1024×1024

Линейная часть графика соответствует степенному распределению с $\alpha = 1/3$. Отклонение от масштабно инвариантного поведения при больших S связано с конечностью размеров системы.

Развитие очень больших лавин обрывается из-за достижения ими нижнего края решетки, что обуславливает горб в правой части графика. Такие события можно трактовать как сверхкатастрофы – порождающая их система оказывается мала для нормального завершения этих лавин.

Многие масштабно инвариантные системы обладают иерархической структурой. Например, литосферу Земли можно представить как систему блоков, разделенных разломами. Каждый из этих блоков делится на более мелкие,

Нижний край решетки является открытым, так что при осыпании ячейки из нижнего слоя две песчинки покидают систему. Это обеспечивает существование стационарного состояния и возможность самоорганизации.

Характеристикой лавины осыпаний является ее размер S , т.е. число ячеек, где произошло осыпание. Лавины распределены по размеру степенным образом с показателем, равным $1/3$ [21], что подтверждается симуляцией модели (компьютерными расчетами в соответствии с описанными правилами), результаты которой приведены на рис. 7.

Масштабно инвариантное распределение означает склонность системы к катастрофам. Ее отклик на элементарное воздействие не имеет собственного характерного размера, и поэтому в ней возможны гигантские события без отчетливых причин. И хотя для каждой лавины можно указать ту самую песчинку, которая ее спровоцировала, корни катастроф лежат, конечно же, не в

Универсальность устройства систем, склонных к катастрофам

те, в свою очередь, на еще более мелкие и т.д. Геофизики выделяют более 30 иерархических уровней в земной коре от тектонических плит протяженностью в тысячи километров до зерен горных пород миллиметрового размера. Большие землетрясения обычно сопровождаются многочисленными повторными толчками – *афтершоками*, которые каскадом перераспределяют напряжение вниз по иерархии разломов. А подготовка землетрясения происходит посредством *обратного каскада* передачи напряжения, восходящего с нижних уровней иерархии к верхним.

Напрашивающимся примером иерархической системы, связанной с деятельностью человека, служит система административного или военного руководства. Успех в решении задач на некотором уровне управления определяется эффективностью функционирования нижележащих уровней.

Иерархической системой является и электорат. Он также делится на несколько групп со своими интересами. Каждая из них складывается из более мелких подгрупп и т.д. – вплоть до отдельного избирателя.

Мы можем наблюдать поведение иерархических систем только на верхних уровнях иерархии (землетрясения, исполнение распоряжений, результаты голосования). Однако причины событий лежат на нижних уровнях, и важно представлять, как происходит взаимодействие уровней.

Рассмотрим иерархическую систему, фрагмент которой изображен на рис. 8 [22,23]. Система разбита на уровни, которые можно интерпретировать как степени детализации описания (чем ниже уровень, тем детальнее). Каждый элемент уровня $i > 0$ состоит из трех элементов предыдущего уровня $i-1$. Элементы системы могут быть *исправны* или *дефектны*.

Пусть на нижнем уровне $i = 0$ состояние элементов полностью случайно и концентрация дефектных элементов есть p_0 .

Элементы нижележащих уровней, тройками объединяющиеся в элемент следующего уровня, передают ему свое состояние в соответствии с уровнем его *восприимчивости* к дефектам k . Под уровнем восприимчивости элемента будем понимать минимальное число дефектных составляющих, необходимых, чтобы и он стал дефектным. Будем считать невозможным самопроизвольное возникновение и выправление дефектов. Тогда система может состоять из элементов всего трех типов с $k = 1; 2; 3$, т.е. становящихся дефект-

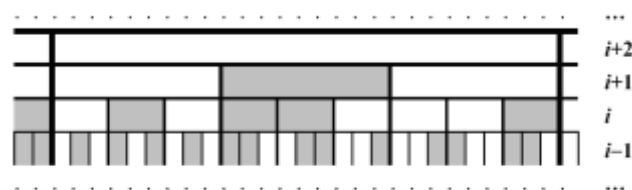


Рис. 8. Фрагмент иерархической системы

Каждый элемент i -го уровня состоит из трех элементов $(i-1)$ -ого уровня.

Элементы системы могут быть исправны или дефектны (показаны заливкой). Состояние каждого элемента определяется состоянием образующих его элементов предыдущего уровня, а также его собственной восприимчивостью к дефектам.

Рисунок соответствует ситуации $s_2 = 1$, $s_1 = s_3 = 0$, т.е. все элементы имеют одинаковую восприимчивость и становятся дефектными, когда дефектно не менее двух из трех образующих их элементов.

ными, соответственно, если дефектна хотя бы одна составляющая, если дефектны не менее двух составляющих и если дефекты все три составляющие.

Обозначим доли элементов типа k через s_k . При этом, очевидно, $s_1 + s_2 + s_3 = 1$.

Основной вопрос, который может быть задан относительно описанной системы: каково ее состояние на верхних уровнях (вплоть до последнего, содержащего один-единственный элемент, который суть сама система) при заданных концентрациях дефектов на самом нижнем уровне и долях элементов различной восприимчивости?

Изменение концентрации дефектных элементов p при подъеме на один уровень дается отображением

$$p_{i+1} = s_1 \cdot (1 - (1 - p_i)^3) + s_2 \cdot (p_i^3 + 3p_i^2(1 - p_i)) + s_3 \cdot p_i^3.$$

Оно всегда имеет две тривиальные неподвижные точки $p = 0$ и $p = 1$, соответствующие бездефектному и полностью дефектному состояниям, и критическую точку

$$p_c = (1 - 3s_1)/(3s_2 - 1),$$

которая должна удовлетворять условию $0 < p_c < 1$, чтобы иметь физический смысл.

Взаимное расположение и устойчивость неподвижных точек зависит от значений s_k . На рис. 9 приведена фазовая диаграмма для рассматриваемой системы. Как видно из рисунка, пространство параметров распадается на четыре области (фазы): две, в которых одна тривиальная неподвижная точка устойчива,

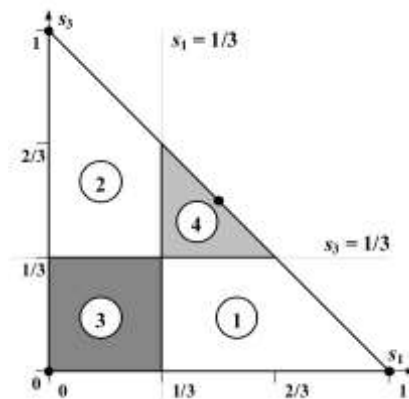


Рис. 9. Фазовая диаграмма для иерархической системы в проекции на оси s_1 – s_2

В случае $s_1 < 1/3$ (области 2 и 3) устойчиво бездефектное состояние $p = 0$. В случае $s_3 < 1/3$ (области 3 и 1) устойчиво полностью дефектное состояние $p = 1$.

При одновременном выполнении этих условий (область 3) между устойчивыми неподвижными точками $p = 0$ и $p = 1$ отображения лежит его неустойчивая неподвижная точка p_c , которая соответствует обычному критическому поведению. Если же оба условия нарушаются (область 4), то между двумя неустойчивыми состояниями оказывается устойчивое, что соответствует самоорганизованной критичности.

Четырём жирными точечками отмечены разбираемые в тексте примеры систем с различной восприимчивостью элементов к дефектам.

вторая – неустойчива, а критической точки нет вовсе, и две, в которых критическая точка есть (на рис. 9 залиты оттенками серого).

Рассмотрим более подробно примеры поведения системы, соответствующие каждой из областей пространства параметров. [22,23]

1. При $s_1 = 1$ и $s_3 = s_2 = 0$ для возникновения дефектного элемента достаточно, чтобы хотя бы одна из его частей была дефектной. Соответственно, единственная устойчивая неподвижная точка отображения $p = 1$, и любая ненулевая концентрация дефектов на нижнем уровне приводит к дефектности всей системы.

2. При $s_3 = 1$ и $s_2 = s_1 = 0$ для возникновения дефектного элемента необходимо, чтобы все его части были дефектными. Соответственно, единственная устойчивая неподвижная точка отображения $p = 0$, и любая ненулевая концентрация исправных элементов на нижнем уровне гарантирует исправность всей системы.

3. Если $s_2 = 1$ и $s_1 = s_3 = 0$, дефектный элемент возникает, если более половины из его частей дефектны. При этом оба крайних значения $p = 0$ и $p = 1$ устойчивы и состояние системы в целом определяется концентрацией дефектов на нижнем уровне. Если $p_0 < p_c = 1/2$, то система будет исправна (что сводится к варианту 2), а если $p_0 > p_c$ – дефектна (вариант 1). И лишь в случае $p_0 = p_c$ критическая концентрация дефектов будет сохраняться от уровня к уровню.

4. Если $s_2 = 0$ и $s_1 = s_3 = 1/2$, то система представляет собой смесь в равных долях элементов двух разных типов: одни ведут себя по правилу 1, усиливая дефекты, а другие – по правилу 2, подавляя их. При этом критическая точка устойчива, и вероятность дефектности системы в целом p_c не зависит от концентрации дефектов на нижнем уровне, коль скоро $p_0 \neq 0;1$.

Свойства систем, рассмотренных в примерах 1 и 2, где нет критической точки, вполне предсказуемы и, следовательно, эти системы не таят никакой опасности.

Однако в критическом состоянии система может с ненулевой вероятностью оказаться как исправной, так и дефектной. И если в примере 3 это происходит лишь при специальном значении $p_0 = p_c$, то в примере 4 – уже при любом $p_0 \neq 0;1$. Первый случай соответствует обычному критическому поведению, когда для появления у системы целостных свойств требуется специальная подстройка, а второй – самоорганизованной критичности, возникающей за счет действия отрицательной обратной связи, которая уменьшает отклонение p_i от p_c при подъеме по уровням.

Рассмотренная модель демонстрирует базовый механизм возникновения масштабно инвариантных свойств и катастрофического поведения в иерархических системах.

Отметим также, что, поскольку в критическом состоянии на всех уровнях концентрация дефектных элементов одинакова, то их распределение по размеру имеет степенной вид с показателем $\alpha = 1$.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Для многих систем, склонных к катастрофическому поведению, на нынешнем уровне развития науки не представляется возможным предложить детальные математические модели, обладающие предсказательной силой, поэтому прогноз приходится строить иначе. Вместо детального описания процесса подготовки катастрофы используются общие свойства нелинейных динамических систем.

Отправной точкой для предсказания катастроф является тот факт, что катастрофическая динамика не есть хаотический процесс. В силу своей целостности критические системы долго "помнят" произошедшие события и "чувствуют" их на больших расстояниях от мест, где события произошли. Математически это отражается степенным убыванием временных и пространственных корреляций, которые для некритических систем обычно убывают экспоненциально (что означает быстрое забывание системой своей истории и слабую взаимозависимость ее частей).

Вновь в качестве примера рассмотрим кучу песка. Ее текущее состояние определяется локальным наклоном поверхности. Крутые участки более склонны к участию в лавинах, пологие – менее. Чтобы было возможно возникновение гигантской лавины, в системе должен иметься некоторый избыток песка. Однако он не может сосредоточиться на каком-то одном участке, не нарушив его устойчивости задолго до возникновения гигантской лавины. Следовательно, значительная часть кучи должна иметь большой локальный наклон. Соответствующее количество песка может быть доставлено от вершины к нижележащим участкам только посредством лавин, среди которых должны быть и довольно крупные.

Таким образом, гигантское событие должно иметь предвестников в виде предшествующих событий меньшего размера. Это вывод справедлив и для других самоорганизованно критических систем, хотя конкретная структура предвестников может зависеть от особенностей рассматриваемого явления.

Исходя из универсальности катастрофических процессов, можно ожидать, что алгоритмы выявления предвестников и прогноза гигантских событий, построенные и доказавшие свою эффективность на одном материале (сейсмология), могут быть с успехом перенесены на другие (экономика, социология, динамика преступности).

Прогнозирование в сейсмологии

Неустойчивость на высших уровнях иерархических систем порождается нестабильностью на низших уровнях. В частности, обратный каскад перераспределения напряжений в земной коре, подготавливающий крупное землетрясение, проявляется в виде аномальной сейсмической активности на меньших масштабах энергий и размеров. Это делает возможным прогноз, основанный на наблюдениях за активизацией и другими отклонениями поведения системы от тренда, за кластеризацией актов нестабильности, раскорреляцией и т.д.

На первом шаге разработки алгоритма предсказания катастрофических событий вырабатываются методы сворачивания огромной информации, которую дает мониторинг, в небольшой набор *функционалов* – зависящих от времени величин, которые в агрегированном виде характеризуют состояние системы. Возможность введения функционалов, пригодных для прогноза поведения сложной системы, вообще говоря, неочевидна. Тем более неочевидна их конкретная форма, поэтому на данном этапе ключевым оказывается взаимодействие специалистов по прогнозу с теми, кто представляет себе динамику системы, хотя бы качественно, и может сказать, каким образом следует учитывать в ней взаимодействие иерархических уровней.

Следующий шаг состоит в определении наиболее информативных функционалов, а также в конструировании алгоритма, позволяющего объявлять тревогу на основе значений этих функционалов. "Обучение" алгоритма состоит в подборе параметров, используемых для вычисления функционалов, установлении для них порогов, превышение которых может свидетельствовать о входе системы в опасную область, и формулировании правила объявления тревоги. "Обучение" имеет целью оптимизировать его способность к ретроспективному прогнозу (прогнозу уже случившихся катастроф) на основе информации о предшествовавшей им активности.

Наконец, заключительным шагом является тестирование в реальных условиях, направленное на определение эффективности алгоритма. На этом этапе корректировка его параметров не допускается.

Проиллюстрируем описанную схему на примере алгоритма среднесрочного прогноза сильных землетрясений, известного в литературе как M8 [24,25,26,27].

Рассматриваются области, размер которых определяется магнитудным порогом прогнозируемых событий (для модификаций алгоритма, нацеленных на прогноз землетрясений магнитудой свыше 6.5, 7.0, 7.5 и 8.0 баллов используются, соответственно, круги диаметром 384 км, 560 км, 854 км и 1333 км). Эти области располагаются на сейсмических поясах (глобальных протяженных районах концентрации очагов землетрясений) и покрывают зону подготовки предполагаемого сильного землетрясения.

Из потока событий, произошедших в данной области, выделяются *основные толчки* – землетрясения, не являющиеся афтершоками. Их последовательность нормализуется магнитудным порогом, который устанавливается таким образом, чтобы среднегодовое количество превышающих его основных толчков составляло определенную величину (10 или 20 штук – соответствующие функционалы помечаются индексами 1 и 2).

На основе данных об основных толчках определяются следующие функционалы:

- N_1 и N_2 – число основных толчков за промежуток времени в 6 лет;
- L_1 и L_2 – отклонение величин N_1 и N_2 от их долговременных трендов;
- Z_1 и Z_2 – отношение среднего размера очага к среднему расстоянию между очагами;

- В – максимальное число афтершоков у основных толчков, вычисляемое за промежутки в 1 год.

Каждый из введенных функционалов вычисляется в трехлетнем временном окне с шагом полгода. В результате поток землетрясений в огрубленном виде описывается скоростью (N), ускорением (L), линейной концентрацией событий (Z) и их группируемостью (B).

Величина функционала считается *аномально большой*, если она превышает Q процентов его наблюдавшихся значений ($Q = 75\%$ для В и 90% – для остальных функционалов). Когда 6 из 7 функционалов, включая В, становятся аномально большими для двух соседних временных интервалов, объявляется *тревога*, или *период повышенной вероятности* (ППВ), который продолжается 5 лет (см. рис. 10).

Области, в которых объявляется тревога по алгоритму М8, на 1-2 порядка по размеру превышают очаг ожидаемого землетрясения, что неприемлемо с практической точки зрения. Поэтому для периодов повышенной вероятности соответствующая зона дополнительно проверяется алгоритмом "Сценарий Мендосино" (MSc) [27,28,29], уточняющим место будущего сильного землетря-

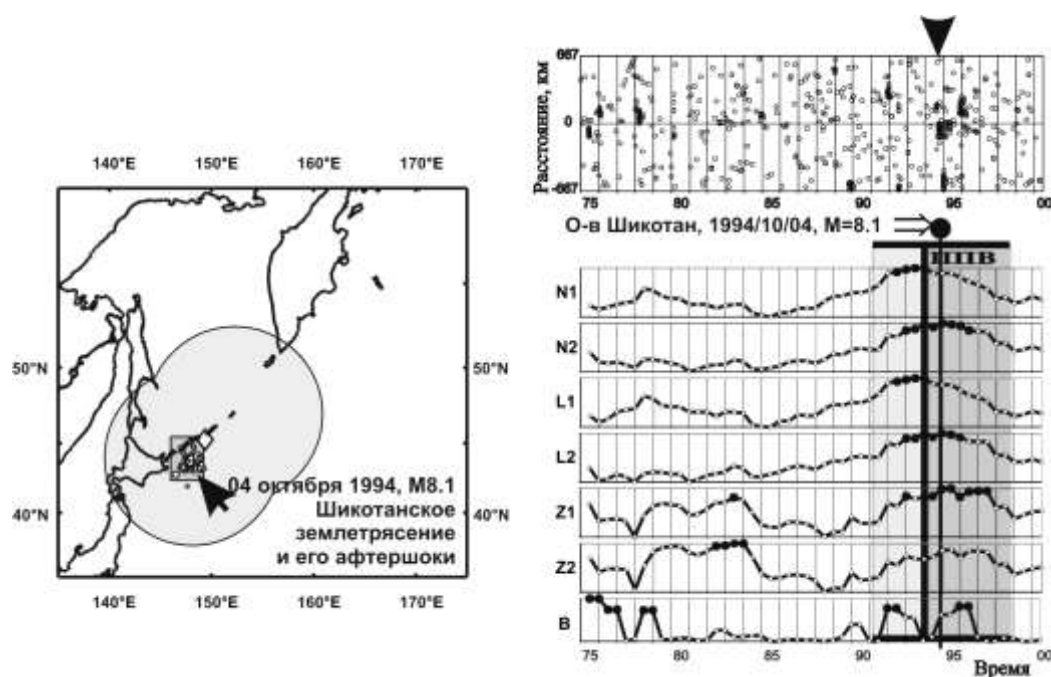


Рис. 10. Пример работы алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений М8 и MSc

Слева – карта прогноза и эпицентры сильнейшего землетрясения и его первых афтершоков. Область тревог, диагностированная алгоритмом М8 показана светло-серыми кругами. Темно-серый прямоугольник – область уточненная по алгоритму MSc.

Справа сверху – пространственно-временная диаграмма сейсмической активности в южном круге, где объявлена тревога. Ось ординат соответствует проекции на ось сейсмического пояса.

Справа внизу – поведение функционалов. Черными точками выделены аномально большие значения. Темно-серая область – период повышенной вероятности, начавшийся после того, как в течение предшествующих трех лет (светло-серая область) было выполнено условие объявления тревоги.

сения и сокращающего зону тревоги в 5-20 раз (см. рис. 10). Этот алгоритм основан на поиске в пространственно-временной зоне тревоги связанных областей (кластеров) относительного сейсмического затишья, сигнализирующих о накапливаемом напряжении.

При построении алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений использовались различные статистические тесты и процедуры, позволяющие оценить достоверность, качество и устойчивость прогноза. Алгоритмы M8 и MSc с 1985 г. проверился прогнозом "вперед", а с 1992 г. проводится и официальное тестирование. Результаты мониторинга сильных событий вперед даны в таблице [27,28]. На рис. 11 показан пример динамики таких прогнозов.

Оценка эффективности алгоритмов M8 и M8-MSc

Прогноз землетрясений с магнитудой $M \geq 8$							
Период теста	Сильные события			Процент объема тревоги p , %		Уровень доверия, %	
	Предсказано		Все-го	M8	M8-MSc	M8	M8-MSc
	M8	M8-MSc					
1985-2003	9	7	11	33,2	17,1	99,87	99,92
1992-2003	7	5	9	28,4	14,4	99,69	99,54

Прогноз землетрясений с магнитудой $M \geq 7,5$							
Период теста	Сильные события			Процент объема тревоги p , %		Уровень доверия, %	
	Предсказано		Все-го	M8	M8-MSc	M8	M8-MSc
	M8	M8-MSc					
1985-2003	30	16	52	34,4	11,1	99,95	99,99
1992-2003	19	10	39	28,8	10,5	99,34	99,43

Эти и другие алгоритмы прогноза землетрясений [25,28, 30], методы определения риска, ущербов и стратегии принятия решений при прогнозе [27,31,32,33] возникли в течение последних десятилетий. Одной из основных причин активного развития идей и принципов прогноза катастроф в сейсмологии являются хорошо налаженные долговременные региональные и мировые службы сбора рутинных данных, дающие возможность сделать "полигоном" для исследований весь мир. Полученные длинные ряды наблюдений существенно облегчают применение методов статистического анализа и проверки гипотез.

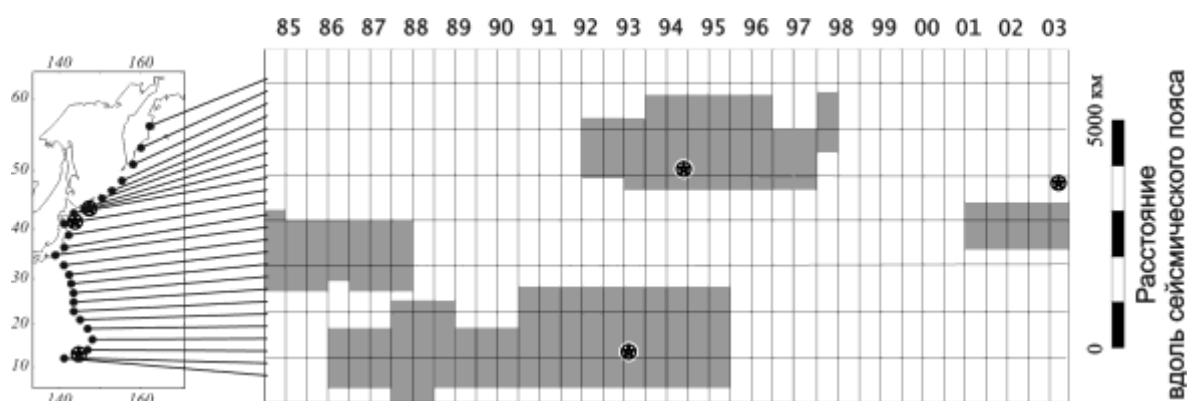


Рис. 11. Пространственно-временное распределение тревог сильных землетрясений с $M \geq 8$ по алгоритму M8 для северо-запада Тихого океана

Точки на карте соответствуют центрам кругов, для которых строится прогноз по алгоритму M8.

На пространственно-временной диаграмме серым обозначены тревоги, а звездочки соответствуют сильным землетрясениям.

Прогнозирование в экономике

При прогнозе рецессий в США применялся подход [34], во многом аналогичный описанному выше. Рассматривался период с 1959 по 1997 гг., содержащий 6 рецессий (больших спадов) экономики США (рис. 12). Анализировалось 8 ежемесячных временных рядов:

- стоимость всего произведенного продукта;
- индекс общей экономической активности;
- доходы населения без социальных выплат;
- число свободных рабочих мест в частных компаниях;
- число запросов на пособие по безработице;
- стоимость запасов на складах в промышленности и торговле;
- 3-х месячная процентная ставка по казначейским векселям;
- разность между значением 10-летней процентной ставкой по государственным облигациям и процентной ставкой по облигациям Федерального резервного фонда США.

Из них было сконструировано 6 функционалов, на основе поведения которых удалось заранее предсказать рецессию 2001 г. (см. рис. 12)

Для прогноза социоэкономических кризисов в России с 1995 г. [1] были выбран российский биржевой индекс АК&М и американский биржевой индекс

Доу Джонс Индастриал. Ряды исходных индексов нестационарны, но между ними могут существовать устойчивые долговременные связи, нарушение которых сигнализируют о дисбалансе в экономике. Оказалось, что для прогноза российских кризисных событий существенна их раскорреляция, такая, когда американский индекс в среднем растет, а российский – падает.

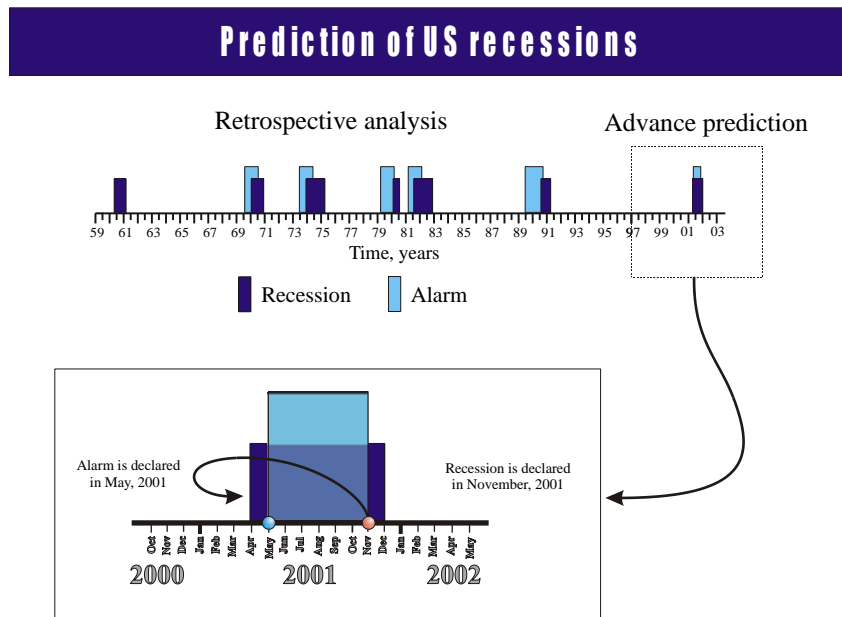


Рис. 12. Прогноз рецессий США

Черные прямоугольники – периоды рецессий, серые – периоды прогнозных тревог.

Диагностика велась с 1963 г. Не было пропущено ни одной рецессии из пяти случившихся за это время рецессий и не объявлено ни одной ложной тревоги. Суммарная длительность тревоги составляет 38 месяцев, или 9.3% проверяемого периода.

Последняя тревога по алгоритму возникла в мае 2001 г. В США рецессия была объявлена лишь в ноябре 2001 г., при этом ее начало было отнесено на апрель 2001 г.

На этой основе был построен функционал Y , представляющий собой кумулятивную сумму относительных приращений индекса АК&М за те промежутки времени, когда он падает, а значения рассматриваемых индексов, сглаженные в 70-

дневном скользящем окне, отрицательно коррелированы.

Начиная с 1995 г., когда появились российские биржевые индексы, на финансовых рынках произошли следующие кризисы:

- банковский кризис ликвидности (25 августа 1995 г.);
- социоэкономический кризис доверия правительству накануне президентских выборов (3 июня – 16 июля 1996 г.);
- обвал фондового рынка (24 октября 1997 г.);
- кризис 17 августа 1998 г., явившийся одновременно валютным, банковским, инвестиционным и кризисом внешнего долга.

Предложенный функционал ретроспективно предсказывает кризисы 1995, 1996 и 1998 гг. (см. рис. 13). Пропуск кризиса 1997 г. объясняется тем, что он был вызван внешним для российской экономики событием – обвалом азиатских фондовых рынков.

Предложенная методика прогноза позволяет сделать одно любопытное наблюдение, которое не является, собственно, целью прогнозирования. Два из трех предсказанных кризисов происходят после того, как прогнозирующий функционал уже вернулся к нулевому значению. Возможно, это отражает специфику российских финансовых рынков. Не будучи непосредственно связанными с национальной экономикой, они являются в известной степени фиктивными, нацеленными не на конкретную деятельность, а на ее имитацию. Поэтому, просигналив о структурном кризисе, рынки быстро подстраиваются к изме-

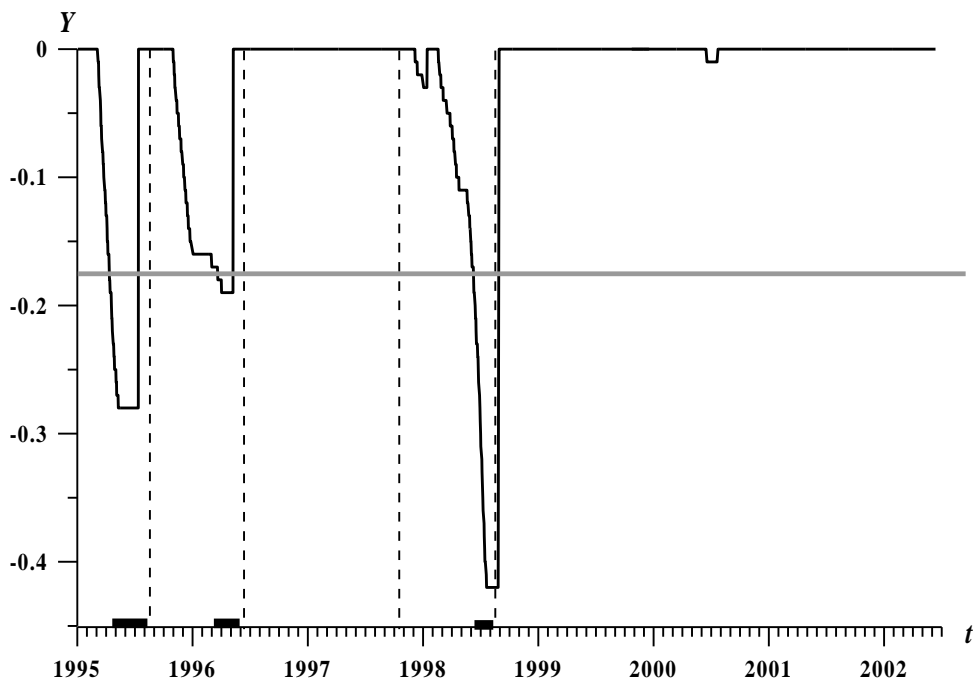


Рис. 13. График прогнозного функционала

Вертикальные пунктирные линии – моменты начала социоэкономических кризисов России.

Горизонтальная прямая линия – порог для объявления тревоги.

Черные прямоугольники внизу соответствуют интервалам тревог. На них приходятся кризисы 25 августа 1995 г., 3 июня – 16 июля 1996 г. и 17 августа 1998 г.

Кризис 24 октября 1997 г. пропущен.

нившимся условиям. Данное обстоятельство несомненно следует учитывать при развитии методов прогноза в экономике.

Прогнозирование в социальных системах

Предсказание в социоэкономических областях [35,36,37,38,39,40] так же как и в сейсмологии базируется на функционалах, чувствительных к предкритическому состоянию системы, за которым следует катастрофическое событие.

Материалы предварительных исследований показывают, что можно развить новый подход в области социоэкономики – "социологию быстрого реагирования". Именно она может оказаться важной для повышения устойчивости функционирования больших городов и страны в целом, а также для предупреждения социальных нестабильностей.

В качестве примера рассмотрим задачу прогноза динамики преступности. Материалом для него послужили записи о происшествиях по г. Ярославлю за период с 3.02.1993 по 25.06.2001. События были разбиты на 5 групп от предположительно происшествий до особо тяжких преступлений:

1. угон автотранспорта, ДТП, скоропостижная смерть и пр.;
2. хулиганство, кража и пр.;
3. телесные повреждения, вымогательство, мошенничество и пр.;
4. обнаружение трупа, самоубийство, грабёж;
5. убийство, тяжкий вред здоровью, изнасилование, разбойное нападение, безвестное исчезновение людей.

Объектом прогноза является скачок особо тяжких преступлений (груп-

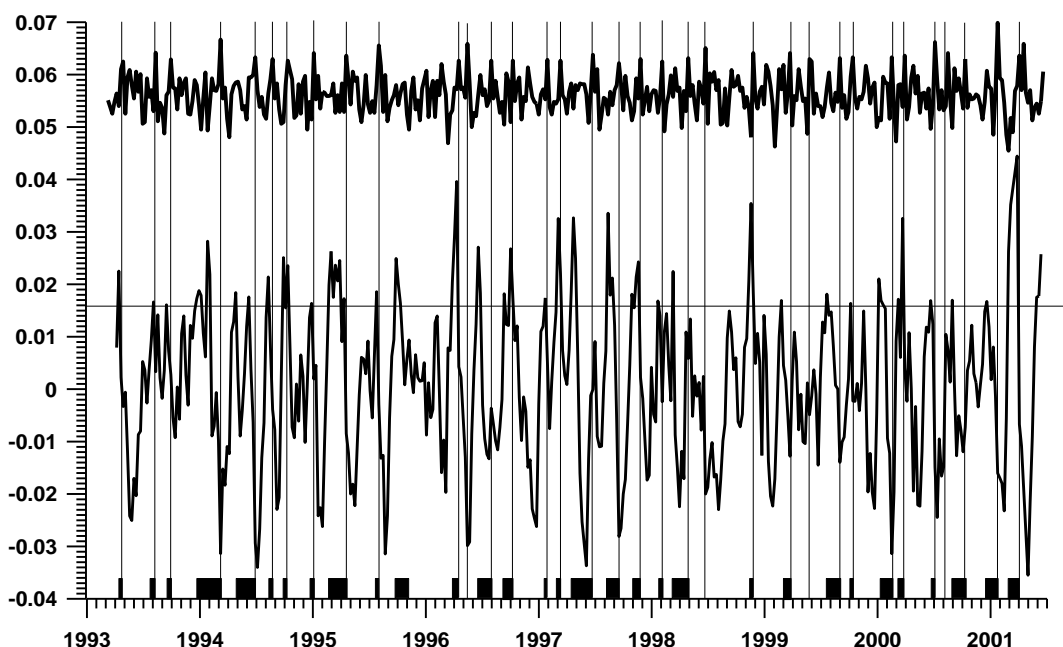


Рис. 14. Прогноз скачков тяжких преступлений в г. Ярославле

Вверху – недельная динамика тяжких преступлений.

Внизу – график остатков для угла наклона графика повторяемости преступности и порог отсечения (горизонтальная линия).

Вертикальные линии – объекты прогноза, являющиеся скачками числа тяжких преступлений, черные прямоугольники внизу – моменты тревоги.

па 5), который определяется как надпороговое превышение их числа за неделю над средним за 5 недель (текущая неделя и 4 предыдущих).

В качестве основной идеи прогноза использовалась аналогия с подготовкой сильных землетрясений, посредством обратного каскада, т.е. миграции активности с нижних уровней к высшим. Динамику таких процессов отражает изменение угла наклона графика распределения событий по величине в двойном логарифмическом масштабе.

При построении такого графика в качестве магнитуды – логарифмической меры тяжести – преступлений использовался номер группы. Тем самым предполагается, что разные группы преступлений соответствуют разным уровням "асоциальной иерархии". В качестве прогнозного функционала рассматривались остатки – разница между текущим углом наклона графика и его средним по времени (рис. 14).

При заданных порогах прогнозируется 30 из 34 объектов (88,2%). Сумма всех тревог составляет 118 недель из 392 недель времени мониторинга (30,1%). В эти 118 недель входит одна ложная тревога, а среднее время тревоги составляет около месяца.

Таким образом, описанные методы прогноза оказываются применимы даже в той области, где не только нет моделей, описывающих динамику происходящих событий, но и хотя бы приблизительных представлений о взаимосвязи различных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги. Неудачный опыт организации многих программ, связанных с прогнозом и мониторингом опасных явлений и процессов, показывает как не должны строиться такие программы. Чтобы быть полезной и востребованной обществом и государством, программа такого рода должна основываться на совершенно иных организационных принципах. Она должна быть отлична и от традиционных программ Президиума РАН, и от Федеральных целевых программ.

Научные труды, карты или экономический эффект не могут быть ее целью. Они лишь инструмент достижения главного результата, каковым должна стать работающая система, обеспечивающая прогноз и мониторинг опасных и кризисных явлений. Эта система требует междисциплинарного подхода и совместной работы исследователей, руководителей и специалистов по управлению риском. Принципиально важно, чтобы эта система стала частью контура управления страной.

В настоящее время Российской академией наук по поручению Совета безопасности РФ и Президиума Государственного совета РФ подготовлена Межведомственная комплексная программа «Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования в интересах обеспечения защищенности опасных объектов и населения». Она направлена на согласование в ряд заинтересованных ведомств. Насколько нам известно, в современной России межведомствен-

ных программ такого типа никогда не было. Поэтому отработанных механизмов их принятия и реализации пока нет. Их придется создать. Беспрецедентность стоящих задач дает надежду, что эта программа может стать именно той "программой нового типа", которая остро нужна России и о которой речь шла в этой статье.

Принципиально важно то, что развитие нелинейной динамики, синергетики дало научную основу и совершенно новые возможности для анализа и прогноза бедствий и катастроф. Мы обсудили общий подход и привели ряд примеров в наиболее сложных случаях, когда

- пока в соответствующих областях нет моделей, позволяющих дать прогноз;

- нет очевидных и общепринятых макропоказателей, по которым можно было бы прогнозировать опасные явления (их введение является результатом совместной работы системных аналитиков, математиков и специалистов из соответствующих областей);

- нет (за исключением землетрясений) сложившихся структур, занимающихся мониторингом и организацией соответствующих информационных потоков.

Тем не менее, в силу универсальности системных свойств многих объектов, в которых возникают катастрофы, и развитых благодаря этому методов мониторинга и предсказания, и в этих системах может быть дан прогноз. Естественно, есть множество более простых ситуаций, где такая работа по предсказанию катастроф может быть организована или уже делается. Кроме того, выполнена большая работа систематизации и описанию многих рисков и угроз [41]. Это дает возможность подняться на более высокий уровень анализа и прогноза.

На наш взгляд, сейчас есть серьезная научная основа для того, чтобы выполнить поручение Президента РФ, касающееся прогноза и предупреждения катастроф и нестабильностей в природной, техногенной и социальной сферах. Выполнение этого поручения, по-видимому, позволит в наибольшей степени использовать и развить потенциал Академии в нынешних исторических условиях.

Литература

1. Малинецкий Г.Г., Осипов В.И., Львов Д.С., Митин Н.А., Гусев А.В. и др. Кризисы современной России: Научный мониторинг// Вестник РАН. 2003. №7, с.579-593. http://www.keldysh.ru/departments/dpt_17/k.html
2. Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. и др. Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика. – М.: Наука, 2000 – 432 с. <http://www.keldysh.ru/papers/2003/source/book/gmalin/risk.htm>
3. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Медведев И.Г., Митин Н.А. Нелинейная динамика и проблемы прогноза// Безопасность Евразии. 2001, №2, с.481-525.
4. Катастрофы и общество. – М.: Контакт-Культура, 2000. – 332 с.
5. Воробьев Ю.Л., Махутов Н.А. Малинецкий Г.Г. Управление риском и устойчивое развитие. Человеческое измерение// Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т.8, №6, с.12-26.
6. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего/ 3-е издание. – М.: Эдиториал УРСС, 2003. – 288 с. <http://iph.ras.ru/~mifs/kkm/Vved.htm>
7. Малинецкий Г.Г. Сценарии, стратегические риски, информационные технологии// Информационные технологии и вычислительные системы. 2002, №4, с.83-108. http://www.keldysh.ru/e-biblio/jj/s_r/jst.htm
8. Малинецкий Г.Г., Курдюмов С.П. Нелинейная динамика и проблемы прогноза// Вестник РАН. 2001. Т.71, №3, с.210-232. http://www.keldysh.ru/departments/dpt_17/neldim.htm
9. Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие/ Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения/ Ред. Г.Г. Малинецкий, С.П. Курдюмов. – М.: Наука, 2002. – 480 с. <http://www.keldysh.ru/book/ns.html>
10. EM-DAT: The OFDA/CRED international disaster database (по состоянию на 24.10.2003). Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium. <http://www.cred.be/emdat>
11. World population data sheet 2002 of the Population Reference Bureau: Demographic data and estimates for the countries and regions of the world. http://www.prb.org/pdf/WorldPopulationDS02_Eng.pdf
12. Kaspersky Labs. <http://www.avp.ru>
13. Родкин М.В., Писаренко В.Ф. Экономический ущерб и жертвы от землетрясений: статистический анализ// Вычислительная сейсмология. 2000. Вып.31, с.42-72.
14. Подлазов А.В. Распределение конкурентов, масштабная инвариантность состояния и модели линейного роста// Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002. Т.10, №1-2, с.20-43.
15. Подлазов А.В. Самоорганизованная критичность и анализ риска// Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2001. Т.9, №1, с.49-88.
16. Малинецкий Г.Г., Потанов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики/ Изд. 2-е, исправл. и доп. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 360 с.
17. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality// Phys. Rev. A. 1988. V.38, N1, p.364-374.
18. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f-noise// Phys. Rev. Lett. 1987. V.59, P.381-384.
19. Бак П., Чен К. Самоорганизованная критичность// В мире науки. 1991. №3, с.16-24.
20. Bak P. How nature works: The science of self-organized criticality. Springer-Verlag, New York, Inc. 1996.
21. Dhar D., Ramaswamy R. Exactly solved model of self-organized critical phenomena// Phys. Rev. Lett. 1989. V.63, N16, p.1659-1662.
22. Shnirman M.G., Blanter E.M. Mixed hierarchical model of seismicity: Scaling and prediction// Phys. Earth Planet. Inter. 1999. V.111, p.295-303.
23. Shnirman M.G., Blanter E.M. Scale invariance and invariant scaling in a mixed hierarchical system// Phys. Rev. E. 1999. V.60, N5, p.5111-5120.

24. Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Периоды повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира. Математические методы в сейсмологии и геодинимике// Выч. сейсмология. – М.: Наука, 1986. №19, с.48-58.
25. Долгосрочный прогноз землетрясений/ Под ред. М.А. Садовского. – М.: Наука, 1986. – 128 с.
26. Keilis-Borok V.I. (eds.). Intermediate-term earthquake prediction: models, algorithms, worldwide tests// Phys. Earth Planet. Inter. 1990. V.61, N1-2 (Spec. Iss.), p.137.
27. Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. (eds). Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction. Springer, Heidelberg, 2003.
28. Keilis-Borok V.I., Shebalin P.N. (eds). Dynamics of lithosphere and earthquake prediction// Phys. Earth Planet. Inter. 1999. V.111, N3-4.
29. Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W. Location of intermediate-term earthquake prediction// J. Geophys. Res. 1990. V.95B, N12. P.19763-19772.
30. Аллен К., Хаттон К., Кейлис-Борок В.И. и др. Долгосрочный прогноз землетрясений и автомодельность сейсмологических предвестников// Достижения и проблемы современной геофизики. – М.: Наука, 1984. С. 152-165.
31. Канторович Л.В., Кейлис-Борок В.И., Молчан Г.М. Сейсмический риск и принципы сейсмического районирования. Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных// Выч. сейсмология. – М.: Наука, 1973. №6, с.3-20.
32. Молчан Г.М. Оптимальные стратегии в прогнозе землетрясений. Современные методы интерпретации сейсмологических данных// Выч. сейсмология. – М.: Наука, 1991. №24, с.3-18.
33. Molchan G.M. Earthquake prediction as a decision-making problem// Pure and Appl. Geophys. 1997. V. 149, p.233-247.
34. Keilis-Borok V., Stock J.H., Soloviev A., Mikhalev P. Pre-recession pattern of six economic indicators in the U.S.A.// Journal of Forecasting. 2000. V.19, P.65-80.
35. Lichtman A., Keilis-Borok V.I. Pattern recognition applied to presidential elections in the United States 1860-1980; Role of integral social, economic and political traits// Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1981. V.78. P.7230-7234.
36. Lichtman A., Keilis-Borok V.I. Aggregate-level analysis and prediction of midterm senatorial elections in the United States, 1974-1986// Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1989. V.86, p.10176-10180.
37. Caputo M., Kolari J. Pattern recognition of the financial condition of banks// ACCADEMIA della SCIENZE di FERRARA, Atti. 1990. V.66-67 anni accademici, 166-167. P.127-139.
38. Sornette D., Johansen A., Bouchaud J.-F. Stock market crashes, precursors and replicas// J. Phys. I (France). 1996. V.6, p.167-175.
39. Гребенюк Е.А., Кузнецов И.В. Применение методов последовательного анализа для прогнозирования резких скачков случайных временных рядов// Автоматика и Телемеханика. 1997. Т.11, с.65-75.
40. Keilis-Borok V.I., Gascon D.J., Soloviev A.A., Intriligator M.D., Pichardo R., Winberg F.E. On predictability of homicide surges in megacities// T. Beer and A. Ismail-Zadeh (eds.), Risk Science and Sustainability Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London, 2003 (NATO Science Series. II. Mathematics, Physics and Chemistry – Vol. 112). P.91-110.
41. Природные опасности России/ Общ. ред. В.И. Осипов, С.К. Шойгу. – М.: КРУК, 2003. Т.1-6.