

Уменьшение сейсмической опасности: упущенные возможности

© **В. Н. Страхов**¹, **М. Г. Савин**², 2013*

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН,
Хабаровск, Россия

Поступила 9 октября 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Обговорено проблему зменшення сейсмічної небезпеки. Виділено і проаналізовано три аспекти розв'язання цієї проблеми: сейсмостійке будівництво, короткотерміновий прогноз катастрофічних землетрусів та ініціація слабкої сейсмічності штучними джерелами з метою розвантаження тектонічного напруження. Зроблено спробу усвідомити причини неоднозначної геофізичної інтерпретації і пов'язані з ними хронічні невдачі у вирішенні питання короткотермінового прогнозу. З критичних позицій викладено фундаментальний методологічний підхід, який ґрунтується на уявленнях класичної фізики, а також нові концепції, що отримали розвиток у межах нерівноважної фізики, такі як режими із загостренням (blow up) і модель самоорганізованої критичності. Підкреслено значущість побудови загальної наукової методології короткотермінового прогнозу катастрофічних землетрусів і необхідність розробки технологій зменшення сейсмічної небезпеки за активної дії на тектонічні процеси.

The article dwells upon seismic hazard reduction. The authors point out and analyze three aspects of solution to the above-mentioned problem: earthquake engineering, short-time prediction of disastrous earthquakes and minor seismicity activation via artificial sources with the view of relieving tectonic stresses. The article attempts to discern the causes of ambiguous geophysical interpretation and associated permanent failures in short-time prediction issue solution. A critical stance is taken towards fundamental methodological approach based on the ideas of classical physics and new concepts studied within the framework of non-equilibrium physics, such as blow-up regime and the model of self-organized criticality (SOC). The authors emphasize the importance of common scientific methodology construction aiming at short-time prediction of disastrous earthquakes and stress the need for the development of seismic hazard reduction technologies via active influence on tectonic processes.

Проблема уменьшения сейсмической опасности была и остается по сей день ключевой для геофизики и одной из важнейших для челове-

чества. Речь идет прежде всего о катастрофических землетрясениях, по масштабу разрушений и количеству человеческих жертв превосхо-

*30 ноября 2012 г., в пятницу, на имя В.И. Старостенко, В. Н. Шумана и И. И. Рокитянского по электронной почте пришло письмо М. Г. Савина. Он сообщал: "Сегодня ... ночью умер Владимир Николаевич Страхов. В.Н. Страхов высоко ценил Вас как ученых ..., любил и уважал "Геофизический журнал", тепло отзывался о своем сотрудничестве с Вами, его коллегами. Слава богу, во вторник он узнал от меня по телефону и очень обрадовался публикации в № 1, 2013 г., в "Геофизическом журнале" нашей совместной статьи (первой из трех, подготовленных специально для "Г. Ж."; в совокупности как бы научное завещание Владимира Николаевича). Это было, вероятно, последнее радостное известие, полученное им на этом свете".

До получения письма М.Г. Савина печальную новость о смерти В.Н. Страхова по электронной почте с прискорбием сообщил В.О. Михайлов (ИФЗ РАН, Москва). Письмо В.О. Михайлова было направлено на имя В.И. Старостенко, И.А. Керимова, П.С. Мартышко и А.И. Кобрунова. — Прим. В.И. Старостенко.

дящих все природные катаклизмы. В XXI в. степень риска от землетрясений возрастает вследствие увеличивающихся темпов урбанизации, строительства атомных электростанций, химических производств, разработки и применения наукоемких технологий и других антропогенных факторов. При этом возникает дополнительная опасность возможных экологических катастроф от землетрясений и спровоцированных, например, крушением нефтеналивных платформ на шельфах Сахалина или затоплений атомных подводных лодок с отработанным ядерным горючим, стоящих на Тихоокеанских причалах, негативные последствия которых могут многократно превысить ущерб от самого сейсмического события. Случилось так, что сейсмические пояса Земли покрывают области с благоприятным климатом, развитой инфраструктурой и концентрацией промышленных предприятий, население которых вынуждено постоянно испытывать страх за свою жизнь и жизнь своих близких. Землетрясения внезапны и неотвратимы как прежде, так и в наши дни, и чреваты тысячами, десятками и сотнями тысяч человеческих жертв, не говоря уже о потере крова, имущества и тяжелейших психических травмах, которые могут сопровождать людей до конца жизни. На память приходят Нефтегорская трагедия на Сахалине (1985), ужасная по силе катастрофа в Индийском океане в 2004 г., сравнительно недавняя серия разрушительных землетрясений в провинции Ниигата в Японии и многие другие, не менее жестокие удары стихии.

В современном мире со все ускоряющимися темпами развития проблема сейсмической безопасности по своему значению становится равновеликой проблеме выживаемости человечества. Это налагает особую ответственность на ученых-геофизиков перед обществом, перед налогоплательщиками, ибо в подобной ситуации никакой разумной альтернативы научному методу пока не просматривается, если исключить не особо заманчивую перспективу всем и сразу покинуть сейсмоопасную территорию, к чему подталкивают долгосрочный прогноз и результаты сейсмического районирования.

В этой связи любопытно вспомнить, о чем писала Постоянная центральная сейсмическая комиссия Императорской академии наук в начале прошлого века. "Сейсмология, самая юная из всех отраслей человеческого знания, — читаем мы в одном из отчетов, — за последнее время быстрыми шагами двинулась вперед, привлекая внимание не только представителей на-

учного мышления, но и широкой публики. Вопросы, трактуемые этой наукой, по справедливости можно отнести к числу увлекательнейших и глубочайших проблем, которые когда-либо волновали человеческий ум ... В последнее время также поставлен на научную основу вопрос о предсказании землетрясений". Эти полные глубокого смысла строки можно с большим основанием отнести и к настоящему моменту, с той лишь оговоркой, что вопрос о предсказании землетрясений на научную основу до сих пор так и не поставлен, если под таковой понимать весь комплекс современных научных представлений. Разумеется, речь идет о практически наиболее значимом краткосрочном (от нескольких суток до нескольких часов) прогнозе катастрофических землетрясений. Косвенно это подтверждается [Страхов и др., 2005] всего лишь двумя уникальными случаями кратковременного прогноза землетрясений (Китай, 1975, 1977), предсказанных в полном объеме (место, магнитуда, время) за более чем полувековую историю исследований.

Неудачи последних лет вынуждают правительства ряда стран свертывать целевое финансирование научных программ по прогнозу землетрясений. Так, в 1994 г. Конгресс США принял подобное решение, при этом внимание было сконцентрировано на сейсмостойком строительстве.

Научно обоснованные рекомендации по нормам строительства и эксплуатации зданий (критерии сейсмической надежности, сейсмического усиления и т. д.) зависят от того, с какой вероятностью в данной местности произойдет землетрясение той или иной силы. Эта задача решается более или менее успешно благодаря долгосрочному прогнозу землетрясений. Как видно на примере землетрясения в Спитаке (1986 г., 6,8 балла, 25 тыс. погибших), нарушение норм строительства чревато страшными последствиями. Вместе с тем сильнейшее землетрясение в Японии 4—11 марта 2011 г., сопровождавшееся чудовищной силы основными толчками, многочисленными афтершоками и разрушительным цунами, не привело к потере устойчивости даже огромных токийских небоскребов.

Однако сейсмостойкое строительство — решение необходимое, но отнюдь не достаточное, поскольку обновление жилого фонда и промышленных объектов не под силу бюджету слабо развитых стран, сотни миллионов людей которых вынуждены жить под постоянной угрозой. Это в полной мере относится к населению Се-

верного Кавказа, Камчатки и Курильских островов. Как показало разрушительное Нефтегорское землетрясение, упомянутое выше, там нормы сейсмостойкого строительства оказались не выдержаны.

Ниже с критических позиций обсуждается фундаментальный методологический подход, используемый в современной геофизике. Делается попытка осознания причин хронических неудач в животрепещущем вопросе краткосрочного прогноза землетрясений. Формулируются два возможных подхода к проблеме уменьшения сейсмической опасности. Изложенная позиция авторов диктуется соображениями здравого смысла, и совсем не обязательно быть сейсмологом (авторы заметки не являются сейсмологами), чтобы прийти к их осознанию. В то же время мы вынуждены признаться, что не знаем гарантированных методов краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений или способов предупредить либо уменьшить сейсмическую опасность, и настороженно отнеслись бы к тому, кто утверждал бы, что знает их и тем более настаивает на их всеобщем принятии и использовании. Необходимо разобраться в ключевой проблеме защиты человека от наиболее коварного стихийного бедствия, а чтобы разобраться самому, нужно думать сообща.

1. КРИЗИС ГЕОФИЗИКИ: КОНЕЦ ДЕТЕРМИНИЗМА

Законы математики, имеющие отношение к реальному миру, не надежны, а надежные математические законы не имеют отношения к реальному миру.

Альберт Эйнштейн

Результаты исследования земных недр, в отличие от исследования околоземного космического пространства, не поддаются прямой экспериментальной проверке. Поэтому вопрос о прогнозе землетрясений тесно связан с нашим доверием к методам геофизики, от которых зависит достоверность интерпретации данных наблюдений. В свою очередь, теоретическая геофизика "дышит" уравнениями математической физики, замешанными на идее детерминизма.

Большинство значимых результатов в сейсмологии, как и в глубинной геофизике в целом, основаны на вере в непогрешимость некоего центрального догмата. Другими словами, структура среды, например, параметры земных оболочек, или их границы, считается истинной, если при математическом моделиро-

вании достигнуто согласование геофизических полей, измеренных на земной поверхности и рассчитанных по математической модели. Понятно, что речь идет о решении обратных задач геофизики. Наиболее распространенный метод решения таких задач — метод подбора, сводящийся к минимизации функционала невязки теоретических и экспериментальных данных. Под "математическим моделированием" понимается перебор (итерации) решений прямых задач или построение геофизических полей (сейсмических, электрических, электромагнитных и других) как решений дифференциальных уравнений при варьировании коэффициентов этих уравнений, они же параметры среды. Когда оказывается, что рассчитанные характеристики геофизических полей наилучшим образом (по некоторой норме) совпадают с измеренными, итерационный процесс прекращается и соответствующие параметры земной коры (плотность, электропроводность, магнитные свойства, границы раздела сред с различными параметрами другие) принимаются за истинные.

Отсюда следует: чтобы решить обратную задачу, нужно сначала решить прямую, т. е. найти распределение полей в среде с известной структурой и заданным источником. И тут-то начинаются затруднения. Во-первых, решения прямых задач хорошо изучены лишь при весьма идеализированных предположениях о структуре среды и источника, например, для плоско-слоистой среды и однородной плоской волны. Для более реалистичных моделей земной коры, включающих двух- и трехмерные непрерывно-анизотропные свойства горных пород, а также естественную неоднородность поля источника, задача исследования уравнений становится весьма нетривиальной. Во-вторых, усложнение уравнений всегда приводит к ухудшению устойчивости при решении обратной задачи, а именно, малые погрешности при измерении полей вызывают увеличение неоднозначности результатов интерпретации. Таким образом, для геофизических задач нарушается условие корректности, сформулированное более 100 лет тому назад Жаном Адамаром [Hadamard, 1902].

Теория некорректных задач существенно продвинулась благодаря идеям А. Н. Тихонова [Тихонов, 1963]. Оказалось, что проблема однозначного восстановления коэффициентов уравнений может быть решена при помощи регуляризирующих алгоритмов, устойчивых по отношению к малым возмущениям начальных данных.

Иначе говоря, нужно перейти от исходных уравнений, выражающих законы природы, к другим уравнениям. И тут возникает еще один вопрос: не теряется ли что-то существенное при подобном переходе?

В редких случаях, например, при бурении сверхглубоких скважин, появляется возможность непосредственной проверки расчетов. Насколько точны эти расчеты, показало бурение сверхглубокой Кольской скважины в 1982 г. Уместно привести некоторые геофизические результаты, изложенные в шестом разделе "Крах гипотез. Проверка расчетов" статьи Л. Н. Шадрин [Шадрин, 1983].

Автор констатирует, что ни один геофизический прогноз не подтвердился. Более того, научные результаты бурения преподнесли ряд открытий, фундаментальных по своему значению, но не согласующихся с полученными ранее результатами интерпретации. Так, на глубине около 7 км отсутствует предсказанный "базальтовый" слой (скорости распространения сейсмических волн не испытывают резкого скачка на предполагаемой границе Конрада, а плавно увеличиваются с глубиной). Второе открытие — неизменность угла наклона древних пород от 45 до 60° по всему разрезу скважины вплоть до глубины 11 км. "Это вступило в противоречие с данными ранее проведенных сейсмических исследований, — пишет Л. Н. Шадрин, — согласно которым угол наклона должен постепенно, начиная с глубины 4 км, "выползаться" до горизонтального залегания". Третье открытие: по результатам бурения геотермический градиент на Балтийском щите оказался в 2 раза больше, чем это предсказывалось по расчетам! Уже на глубине 11 км температура среды была равна 200 °С, в то время как на 15-километровой отметке температура пород, рассчитанная по электропроводности, не должна превышать 150 °С. Так, появление одного черного лебедя разрушило нашу веру в то, что все лебеди белые. Но черный лебедь явился отнюдь не в одном экземпляре. На самом деле геофизические данные по результатам сверхглубокого бурения других скважин обнаруживают не менее удручающую картину. Например, глубокое бурение Саатлинской скважины в Азербайджане выявило несоответствие с расчетными измеренных температур на глубине 6270 м и мощностей слоев осадочного чехла, и т. д.

Если геофизические прогнозы потерпели фиаско даже на Балтийском щите, наиболее благоприятном с точки зрения применения гео-

физических методов, то что можно говорить о геосинклинальных областях, структура которых заведомо не укладывается в рамки одной модели среды? И уж тем более неприменимы уравнения классической физики для исследования нестационарных моделей, связанных с процессами в очаге землетрясения.

Ньютоновский путь развития естественных наук, в сердцевине которого заложена идея детерминизма, привел к колоссальному прогрессу во многих областях человеческой деятельности. Однако в применении к геофизике, методы которой основаны на линейных уравнениях математической физики, об этом нельзя сказать с уверенностью. Оказалось, что императив линейной теории не безусловен, а границы применимости уравнений размыты, поэтому неоднозначность геолого-геофизической интерпретации, особенно в глубинной геофизике, является скорее правилом, чем исключением. Глубинные недра Земли по-прежнему остаются тайной за семью печатями. По-видимому, информация о состоянии глубинного вещества, полученная геофизическими методами, в целом ряде случаев носит абстрактный характер, а ее расшифровка не всегда корректна. Крупнейшие геофизики, такие как наш соотечественник В. В. Белоусов и другие, прекрасно понимали всю условность общепринятых моделей глубинного строения Земли. В этой связи важное и крайне осторожное замечание сделала датский геофизик Инге Леманн, открывшая внутреннее ядро Земли: "Существование внутреннего ядра Земли — это гипотеза, которая, по-видимому, имеет некоторую вероятность, хотя она и не может быть подтверждена имеющимися в наших руках данными".

2. СЕЙСМИЧЕСКАЯ СИМФОНИЯ БЕТХОВЕНА

Не музыка входит в число математических дисциплин, наоборот, естественные науки являются частью музыки, поскольку в их основах лежат пропорции, а пропорции — это порождение звучащего тела.

Жан-Филипп Рамо

Глубокую мысль А. Эйнштейна, высказанную в предыдущем эпиграфе, иллюстрируют дальнейшие рассуждения о "математике очага". Здесь мы вступаем в принципиально новую область исследований — в процесс, развивающийся в реальном времени, процесс нелинейный, необратимый, происходящий в открытой диссипативной среде.

Если древним породам Балтийского щита приписать структуру до-мажорной гаммы, то по сложности математического описания динамику только сейсмических и электромагнитных волн, излучаемых в "момент взрыва" очага землетрясения, можно уподобить симфонии Бетховена. Импедансы (волновое сопротивление) геофизической среды в окрестности скважины, служащие исходными функциями для расчета электропроводности (следовательно, и температуры) геоэлектрического разреза, можно рассчитать за одну минуту. Примерно столько же времени потребуется для неспешного исполнения указанной выше гаммы в расходящемся движении. Для расчета же динамики амплитудно-фазовых соотношений упругих и электромагнитных волн в очаге землетрясения потребуется время, сравнимое со временем существования Вселенной, т. е. около 15 млрд лет!

Спешим утешить читателя, что столь долго загружать ЭВМ нет никакой необходимости, ибо результаты подобного "космического" расчета, основанного на уравнениях классической физики, вряд ли приблизят нас к пониманию сути очаговых процессов. В то же время авторы считают необходимым подчеркнуть, что рассуждения на тему "конца детерминизма" не отменяют предыдущую науку, а лишь призывают к критическому пересмотру результатов интерпретации, хотя можно ожидать и "закрытия" значительной их части.

3. ПОМОГУТ ЛИ НАМ БИФУРКАЦИИ?

Опасайтесь ненужных нововведений, особенно если они логически обоснованы.

Уинстон Черчилль

Необходимость новых подходов, связанных с переходом от простого (классического) мышления к сложному (неравновесная физика, режимы с обострением и т. д.), основные принципы которого сформулированы И. Р. Пригожиным [Пригожин, 1999; Пригожин, Стингерс, 1986] и Э. Мореном [Morin, 1999], бесспорны. Для начала зададимся вопросом: что понимать под "очагом" землетрясения? Одна из сравнительно простых моделей очага для мелкофокусных и наиболее разрушительных землетрясений ассоциируется с нарушением сплошности среды и образованием микротрещин. Они зарождаются под влиянием зашкаливающих тектонических напряжений в горных породах и

стремительно перерастают в трещины. Процесс становится лавинообразным и сопровождается излучением колоссальной энергии в виде разрушительных сейсмических волн. Итак, мы имели дело с регулярной структурой, земной твердью, которая внезапно (не исключая стадию подготовки) перешла в хаотический режим.

Возникает вопрос: где лежит граница между регулярной, хотя и сложно организованной средой и хаосом? Согласно И. Р. Пригожину, критерием может служить устойчивость возникающих образований по отношению к малым возмущениям. Если такая устойчивость отсутствует, детерминированное описание (при помощи уравнений классической физики) теряет смысл и необходимо использовать вероятностный подход (статистические методы). Переход от регулярной структуры к хаотической происходит не постепенно, а только скачком. В рамках линейной постановки задачи естественно предположить, что в момент "X" (начало лавинообразного процесса) малые возмущения в очаге приводят к экспоненциальному возрастанию его характерных параметров, поэтому точное предсказание поведения системы не представляется возможным.

Исследование свойств хаотических режимов, наступающих вслед за разрушением регулярных структур, — одна из важных задач синергетики и нелинейной динамики. Термин "синергетика" был предложен Г. Хакеном [Хакен, 1991] еще в 1970-х годах для обозначения самоорганизации в живых и неорганических структурах. Однако еще задолго до появления этого термина в классической гидродинамике (теория подобия) использовались безразмерные параметры, определяющие переход от одного режима в другой. Так, число Маха, равное единице, характеризует переход от дозвукового течения воздуха к сверхзвуковому, малые значения числа Рейнольдса соответствуют ситуации, когда силы вязкости гасят турбулентность, делая поток жидкости ламинарным.

Реальная геофизическая среда, не находящая опоры в классических представлениях, неизмеримо сложнее гидродинамических моделей. Поэтому надежды на универсальные критерии подобия, позволяющие моделировать физические процессы в очаге, вряд ли оправданы. Эти процессы, по-видимому, имеет смысл изучать в рамках режимов с обострением (blow up), неразрывно связанных с ключевыми понятиями неравновесной физики. Подобные режимы сверхбыстрого нарастания процессов в открытых нелинейных системах, при которых

характерные величины (температура, энергия и т. д.) неограниченно возрастают за конечное время (режимы с обострением), активно исследуются научной группой в Институте прикладной математики РАН [Князева, Курдюмов, 1994]. Основой механизма процессов с обострением является нелинейная положительная обратная связь. При этом неизбежный распад быстро развивающихся структур не связан с экспоненциальным разбеганием сложных траекторий (следствие линеаризации модели), а протекает в режиме с обострением. Если на ранней стадии процесса малые возмущения способны гаситься, то вблизи момента обострения структура развивается чрезвычайно быстро. Действительно, заключительная фаза подготовки землетрясения характеризуется резкой активизацией напряженно-деформационного состояния горных пород. На несколько порядков возрастают скорости деформаций, что приводит к росту отношения сигнал/шум, поэтому параметры разрушения легче диагностируются геофизическими методами. Процесс становится необратимым, лавинообразным. Весьма вероятно, что модель режимов с обострением может соответствовать лавинообразному нарастанию микротрещин и других подобных процессов в очаге землетрясения, хотя подобного рода конкретные исследования авторам не известны.

Большой резонанс вызвала концепция "самоорганизованной критичности" (СОК) [Shaw, Chouet, 1991; Bak, 1997], основные результаты которой получены при компьютерном моделировании динамики лавин. Эта концепция пролила свет на особенности эволюции самоподобия открытых диссипативных систем, к которым можно отнести и геофизические среды. Согласно представлению СОК, вследствие нелинейности системы любое слабое возмущение может привести к разрушительному землетрясению. Тем самым утверждается, что землетрясение происходит, минуя стадию подготовки, следовательно, все попытки прогноза сейсмического события бесперспективны. По вполне понятным причинам геофизическая интерпретация модели СОК, закрывающая возможность прогноза, вызвала серьезные возражения среди наших ведущих сейсмологов. Однако последовавшая научная дискуссия по поводу "принципиальной возможности/невозможности предсказания землетрясений" представляется нам не заслуживающей внимания риторикой. В то же время С. Ф. Тимашевым [Тимашев, 2003] указано, что "расчеты на основании концепции СОК не позволили продвинуться в решении практи-

ческих проблем параметризации реальных процессов и структур, прогнозирования их динамики на основе анализа пространственно-временных серий измеряемых динамических переменных. Эта цель практически не была достигнута и при использовании численных методов анализа, разработанных на основе теории детерминированного хаоса".

4. НЕИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Душа, не стремись к вечной жизни, но постарайся исчерпать то, что возможно.

Пиндар. Пифийские песни

Неудачи последних лет не прибавили энтузиазма ученым в отношении краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений. В самом деле, синергетика недвусмысленно указывает на невозможность предсказания будущего на основе предыдущего опыта. Сейсмологи констатируют мерцательный характер некоторых эффектов, например, модуляцию эндогенных микросейсм сверхслабыми воздействиями: "По сути дела, речь идет о воспроизводимости наблюдений, — делается вывод в работе [Николаев, 1987]. — Во многих случаях воспроизведение *in situ* сложных условий, влияющих на ход процесса, оказывается невыполнимым". Подчеркивается [Савин, 2010] факт неповторимой индивидуальности параметров очага землетрясения, таких как координаты, глубина, фокальный механизм, тип подвижки, магнитуда, степень зрелости. "Именно по этой причине, — указывается в работе [Комаров, 2011], — один и тот же предвестник для различных очагов наполняется различным содержанием, что, в свою очередь, делает ничтожной любую, даже самую изошренную интерпретационную картину. Очаг становится неуловимым: мы гоняемся за ним с сачком, как за бабочкой, а он уплывает от нас глубинной рыбой, на которую надо ставить сеть". Иногда возможность краткосрочного прогноза землетрясений не без некоторых оснований сравнивается с предсказанием поведения отдельной снежинки в снежной лавине или отдельной молнии в грозе и т. д.

Не вызывает сомнения факт, что традиционные принципы научного познания (принцип верификации, детерминизма и др.) не соответствуют реальной сложности процессов в сейсмологии и подлежат пересмотру. Однако он не

должен приводить к унынию и к неоправданно пессимистическому выводу о принципиальной невозможности краткосрочного прогноза. Напротив, выдвигается тезис "наука больше, чем наука" (в традиционном ее понимании), выражающий потенциальную готовность научного сообщества к "новому диалогу с природой", который неизбежно должен привести к решению острейших практических проблем сейсмологии и новым прорывам в доселе неведомое, не менее ошеломляющим, чем блестящие достижения XX в. В этом контексте заявления о "принципиальной невозможности" предсказания землетрясений уместно было бы заменить на "принципиальную неизбежность" прогноза.

В русле изложенного уместно сосредоточить внимание на двух упущенных, хотя ранее и освещенных в литературе, но до конца не исследованных и тем более практически не реализованных возможностях в развитии сейсмологии. Мы говорим именно об "упущенных возможностях", ибо геофизическая общественность, не отрицая таковые, до сих пор оказалась не готовой осознать их большую значимость для продвижения в решении проблемы уменьшения сейсмической опасности. Особенностью формулируемых ниже направлений являются простота и ясность постановки задачи, которая в то же время не затрагивает дискуссионных

проблем геофизики, таких как гипотеза плитовой тектоники, "расширяющейся Земли" и других, или решаемых в долгосрочной перспективе, например, построение новых концепций в сейсмологии на принципах неравновесной физики.

Итак, первое направление [Страхов, 2004] лежит в русле традиционных геофизических исследований и связано с построением общей научной методологии наиболее значимого краткосрочного прогноза землетрясений, которая в настоящее время отсутствует. Суть проблемы состоит в формулировке и выполнении необходимых и достаточных признаков для ее решения. При этом обязательным условием становится комплексирование максимально возможного числа изучаемых предвестников, которых насчитывается более 100, включая измерение аномалий геофизических полей, деформационно-напряженного состояния пород, химические, биологические и прочие неустойчивые по своей природе признаки надвигающегося сейсмического события.

Второе направление [Савин, Смагин, 2004] состоит в разработке технологий уменьшения сейсмической опасности путем активного воздействия на тектонические процессы с целью управления сейсмическим режимом. Подробное изложение этих направлений читатель найдет в наших следующих статьях.

Список литературы

- Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — Москва: Наука, 1994. — 215 с.
- Комаров С.М. Дрожь Земли // Химия и жизнь. — 2011. — № 7. — С. 2—7.
- Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмологии // Проблемы нелинейной сейсмологии. — Москва: Наука, 1987. — С. 5—20.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. — Москва: Прогресс, 1986. — 432 с.
- Пригожин И.Р. Постигание реальности // Природа. — 1999. — № 6. — С. 3—11.
- Савин М.Г. Несостоявшиеся землетрясения // Химия и жизнь. — 2010. — № 12. — С. 18—21.
- Савин М.Г., Смагин С.И. Применение МГД-генераторов в геофизических исследованиях на Дальнем Востоке (к разработке технологий уменьшения сейсмической опасности) // Вестн. ДВО РАН. — 2004. — № 2. — С. 129—143.
- Страхов В.Н. Как геофизики должны осуществлять краткосрочный прогноз землетрясений? // Геофизика. — 2004. — № 6. — С. 54—57.
- Страхов В.Н., Соболев Г.А., Рукин М.Д., Моргунов В.А., Сигорин А.Я. О необходимости Федеральной программы работ по решению проблемы краткосрочного прогноза землетрясений. — Москва: ОИФЗ РАН, 2005. — 40 с.
- Тимашев С.Ф. О базовых принципах "нового диалога с природой" // Проблемы геофизики XXI века. — Москва: Наука, 2003. — С. 104—141.
- Тихонов А.Н. О регуляризации некорректно поставленных задач // Докл. АН СССР. — 1963. — 141, № 1. — С. 49—52.

- Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. — Москва: Мир, 1991. — 258 с.
- Шагрин Л.Н.* Бурение на подступах к мантии // Природа. — 1983. — № 1. — С. 12—22.
- Bak P.* How nature works: The science of self — organized criticality. — Oxford: Oxford Univ. Press, 1997. — 212 p.
- Hadamard J.* Sur le problems aux derives partielles et leur signification physique. — Princeton: Bull. Univ. Princeton, 1902. — V. 13. — 49 p.
- Morin E.* Introduction a la preensee complexe. — Paris: UNESCO, 1999. — P. 313.
- Shaw H., Chouet P.* Fractal hierarchies of magma transportation and critical self-organisation of tremors // J. Geophys. Rev. — 1991. — 6. — P. 10191—10207.