



Прогноз землетрясений: проблема и пути ее решения

ЗАВЬЯЛОВ А.Д.,
доктор физико-математических наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Землетрясение – как любовь, – когда оно начинается,
никогда не знаешь, каким сильным оно будет.

К.Г. Плетнёв, устное сообщение

В статье автор знакомит читателей с одним из проявлений природных катастроф – землетрясением: что это такое, как и где оно происходит; мож-



но ли прогнозировать землетрясения и как это делается, что надо делать, чтобы предотвратить гибель людей в результате землетрясений.

ЖИВАЯ ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

Многие годы наблюдений человека за планетой, на которой он живет, привели его к мысли о том, что Земля – не мертвое, бездушное тело, а живой, развивающийся по своим законам, сложнейший организм. Незнание или игнорирование этих законов может привести

к “бунту” природы против человека и человечества. Уже в наше время мы все чаще становимся свидетелями (а, порой, и соучастниками) экологических катастроф, часто возникающих в результате конфликта человека и природы. Причина этих катастроф во многих случаях – проявление той внутренней жизни нашей

планеты, которая еще не до конца познана наукой.

По своим разрушительным последствиям, количеству жертв, материальному ущербу и деструктивному воздействию на среду обитания человека землетрясения занимают одно из первых мест в ряду других видов природных катастроф. Эти грозные явления природы

опасны не сами по себе, а потому что происходят именно там, где человек живет и работает. Исторически сложилось, что людям было удобно и экономически выгодно селиться именно там, где, как впоследствии оказалось, время от времени внезапно возникают землетрясения; этот факт приводит к еще более тяжелым, разрушительным последствиям. Разрушения, гибель людей вызывают не только собственно вибрации грунта при прохождении сейсмических волн; не менее опасны и вторичные природные явления (цунами, крип, оползни, обвалы, снежные лавины, сели), они могут активизироваться при землетрясениях. Большую опасность представляют и вторичные техногенные воздействия (и их последствия): пожары, взрывы, выбросы радиоактивных и токсичных материалов; часто именно они наносят при землетрясениях наибольший ущерб.

Вспомним катастрофические землетрясения последних лет: например, землетрясение на о-ве Суматра 26 декабря 2004 г. В результате возникновения мощного цунами (а также практически полного отсутствия службы предупреждения о его приближении) погибли около 300 тыс. человек. Приведем еще один пример – Великое японское земле-



Академик Б.Б. Голицын.

трясение, произошедшее 11 марта 2011 г.: образовавшееся цунами смыло все постройки в прибрежной зоне и затопило резервную систему электроснабжения действовавшей атомной электростанции Фукусима; по этой причине была нарушена работа системы охлаждения атомного реактора и он был остановлен. И таких примеров можно привести множество.

Стихийные явления (и землетрясения в том числе) неизбежны. Их нельзя предотвратить, но уменьшить разрушительное влияние можно и нужно. Для этого необходимо изучать процессы, связанные с готовящимся землетрясением, знать причины их возникновения, разрабатывать методы прогноза этих явлений. Но нельзя не сказать и об их позитивной роли: изучая землетрясе-

ния, наука получает бесценную информацию о процессах, происходящих в недрах Земли, недоступных человеку. По образному выражению патриарха российской сейсмологии академика Б.Б. Голицына (1862–1916): «Можно уподобить всякое землетрясение фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя тем самым рассмотреть то, что там происходит». Эти слова были сказаны им еще в самом начале XX в. Благодаря трудам Б.Б. Голицына наука о землетрясениях превратилась из описательной (и во многом гипотетической) в строгую научную дисциплину; полученные в результате исследований данные базируются на инструментальных наблюдениях. В некотором смысле ученые, исследующие землетрясения, а также проходящие упругих сейсмических волн в толще земных недр, похожи на медиков, получающих информацию об устройстве живых существ, проводя исследование их внутренних органов.

ЧТО МЫ ЗНАЕМ
О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ?

Землетрясение – слово русское, поэтому смысл его ясен: это “трясение” земли; точное научное определение этого явления – колебания земной поверх-



Схема, поясняющая положение эпицентра и гипоцентра (очага) землетрясения. Инфографика РИА-Новости.

землетрясений с магнитудой $M \geq 7,0$; 93 из них имели магнитуду, равную и более 8,0. Заметим, что самое сильное землетрясение на нашей планете, зарегистрированное с помощью приборов (то есть инструментально) имело магнитуду $M = 9,5$. Это – Великое чилийское землетрясение, произошедшее 22 мая 1960 г.

Людские потери от землетрясений, зафиксированных в период с 1970 по 2017 гг., составили около 1,8 млн человек (около 37,4 тыс. человек в год).

В Российской Федерации около 28% всей территории является сейсмоопасными зонами; здесь возможны сейсмические сотрясения с интенсивностью 7 и более баллов по макросейсмической шкале MSK-64¹. На этой территории проживает более 19% всего населения страны, расположены тысячи больших и малых городов и поселков, десятки крупных гидро- и тепловых электростанций, атомных электростанций и большое количество предприятий, производст-

ности при прохождении волн от источника, находящегося внутри Земли. По-гречески землетрясение – $\sigma\epsilon\iota\sigma\mu\acute{o}\varsigma$ (сейсмоз), отсюда и название направления в геофизике – сейсмология – наука, изучающая землетрясения, их природу, закономерности распространения.

Кажется, что землетрясения – это зло, страшное бедствие для человечества и с ним надо бороться. На что же будет указывать отсутствие землетрясений? По-видимому, это будет означать, что наша планета Земля стала холодным безжизненным телом, на котором людям уже не будет уютно и тепло, поэтому придется ис-

кать другой космический дом. С другой стороны, следуя Б.Б. Голицыну, землетрясения – естественный, бесплатный источник сейсмических волн, которые пронизывают нашу планету и приносят информацию об ее внутреннем устройстве; это свойство землетрясений широко используют ученые-сейсмологи для изучения внутреннего устройства нашей планеты.

Землетрясения составляют около 13% от общего числа природных катастроф, происходящих на нашей планете, занимая третье место. По данным Национального центра информации о землетрясениях США, с 1900 по 2017 гг. на Земле произошло 1346

¹ Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных районах / Под ред. Уломова В.И. и Богданова М.И. // Инженерные изыскания в строительстве, 2016. № 7. С. 49–121.

ва которых представляют повышенную экологическую опасность. Однако и менее сильные продолжительные низкочастотные 4–5-балльные сотрясения, например, в Восточных Карпатах (распространяются на огромные расстояния от заглубленных очагов крупных землетрясений) способны нанести урон чувствительным к таким колебаниям уникальным высотным строительным объектам даже на большом удалении от эпицентров (в том числе на территории Москвы и Московской области). Примером такого воздействия стало мощное глубокофокусное землетрясение, произошедшее в Охотском море 24 мая 2013 г. с магнитудой $M=8,2$: сотрясения, вызванные сейсмическими волнами от этого землетрясения, ощущались на всей огромной территории России; они докатились и до Москвы (расстояние от эпицентра – порядка 6000 км)².

ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ЭКОНОМИКУ И ОБЩЕСТВО

Сейсмическая опасность на Земле увеличивается с каждым годом, этот процесс находится в прямой зависимости от хозяйст-

венного освоения человеком сейсмоопасных территорий и активного воздействия на литосферную оболочку нашей планеты (например, добыча нефти, газа и других полезных ископаемых, строительство крупных гидротехнических сооружений; процесс захоронения промышленных отходов). Следует учесть, что с ростом урбанизации и усилением индустриальной нагрузки на определенную территорию нарастают и потери от землетрясений.

Наука не может пока предсказать время, место и разрушительную силу землетрясения с точностью, достаточной для экономически и социально оправданной экстренной остановки потенциально опасных производств и эвакуации населения. Однако с вероятностью до 70% специалисты могут указать место предполагаемого (потенциального) очага и магнитуду будущего сильного землетрясения с опережением (от 1 до 5 лет; среднесрочный прогноз). Это дает возможность федеральным и региональным властям, структурам Министерства по чрезвычайным ситуациям заранее время для того, чтобы максимально подгото-

виться (противостоять) возможной катастрофе.

Так, в Российской Федерации, основываясь на долгосрочных прогнозах академика С.А. Федотова, выполненными ученым для территорий Камчатки и Курильских островов, принята и реализуется программа по сейсмическому укреплению жилого фонда г. Петропавловска-Камчатского.

Что же является причиной землетрясений? По современным представлениям, землетрясение есть следствие разрыва горных пород (образования гигантских трещин) в глубинах земных недр. Этот разрыв распространяется (или, как говорят, прорастает) со скоростью несколько километров в секунду, а его “берега” при этом излучают упругие волны. Они достигают земной поверхности за несколько секунд, что и вызывает при сильных землетрясениях разрушение зданий и сооружений, приводит к гибели людей.

НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Прогноз землетрясений – сложная научная проблема и благородная цель, которой служит сейсмология. Точно предсказать время возникновения оче-

²Рогожин Е.А., Завьялов А.Д., Зайцева Н.В. Макросейсмические проявления Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. на территории г. Москвы // Вопросы инженерной сейсмологии, 2013. Т. 40. № 3. С. 64–77.

Жигалин А.Д., Завьялов А.Д., Миндель И.Г. и др. Феномен Охотскоморского землетрясения 24 мая 2013 г. в Москве // Вестник РАН, 2014. Т. 84. № 7. С. 601–609.

редных сейсмических толчков (а, тем более, предотвратить их), к сожалению, невозможно. Однако количество разрушений и человеческих жертв могут быть уменьшены путем проведения в сейсмоактивных районах разумной и долговременной государственной политики: в ее основе – повышение уровня осведомленности населения и федеральных органов об угрозе землетрясения и их умении противостоять подземной стихии. Известно, что выполнение упредительных мероприятий обходится государству во много раз дешевле, чем проведение аварийно-спасательных работ в процессе ликвидации последствий стихии, а также возмещение ущерба, вызванного чрезвычайной ситуацией.

Начало широкомасштабных исследований по проблеме прогноза землетрясений относится к середине 1950-х гг. В этот период получили мощное развитие национальные системы сейсмологических и геофизических наблюдений, нацеленные на прогноз сильных землетрясений. К примеру, в СССР были организованы прогностические полигоны в Гарме (Памир, Таджикистан) и на Камчатке. В течение первых 10–15 лет инструментальных наблюдений были зафиксированы и изучены десятки различных явлений – “пред-

вестников” землетрясений. Однако, как правило, это были единичные сообщения и о подавляющем большинстве предвестников не было данных (об их прогностической эффективности).

Значительными вехами в изучении физики очага землетрясения и выявления его прогностических признаков разного генезиса (например, эмиссия радона, деформация земной поверхности) послужили исследования природы разрушительного Ташкентского землетрясения 1966 г. Они были закреплены на I Международном симпозиуме по прогнозу землетрясений, состоявшемся в Ташкенте в 1974 г. под эгидой Международной ассоциации по сейсмологии и физике недр Земли.

Первый и весьма обнадеживающий прогноз сильного землетрясения относится к середине 1970-х гг.; в этот период (июнь 1974 г. – январь 1975 г.) китайские ученые, проанализировав данные наблюдений за различными геофизическими полями, сумели за несколько дней до произошедшего затем Хайченского землетрясения (4 февраля 1975 г.; $M = 7,3$) сообщить о его прогнозе властям провинции Хэбэй (северо-восточный Китай). В результате в считанные часы было эвакуировано население г. Хайчен. Предсказанное землетрясение произошло, но экономический и социальный

ущерб от него был минимизирован. Это землетрясение сейчас часто приводится в качестве классического примера успешного прогноза с использованием комплекса предвестников: в этом районе наблюдали изменения некоторых параметров сейсмического режима – характеристик слабых землетрясений; было отмечено аномальное поведение змей – они выползали из своих норок, несмотря на то, что это был февраль (холодное время), аномально изменялся уровень воды в скважинах.

Этот успех породил волну надежд на быстрое решение проблемы прогноза землетрясений. Казалось, что проблема прогноза землетрясений решена.

Однако, эти надежды не оправдались. Чуть больше года спустя, 28 июля 1976 г., в том же Китае (в 200–300 км к востоку от Пекина) произошло Таншаньское землетрясение ($M = 7,9$), которое целиком разрушило г. Таншань (с миллионным населением) и унесло жизни более 240 тыс. человек. Здесь так же наблюдались многочисленные предвестники, однако отсутствие на тот момент достаточных статистических данных об их достоверности и эффективности не дало возможности объявить тревогу. По образному выражению китайских сейсмологов, день Таншаньского землетрясения стал кош-

Разрушенный землетрясением г. Таншань (Китай), 28 июля 1976 г.

маром для сейсмологии и человеческой цивилизации.

Тем не менее в течение 20-ти последующих лет как снежный ком нарастало число публикаций о зарегистрированных предвестниках землетрясений в разных странах. Специалисты разработали модели подготовки землетрясений, претендующие на объяснение природы “предвестников”. Наиболее популярными из них стали дилатантно-диффузная модель (существенная роль отводится внутривещным флюидам) и модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (упор делался на накопление трещин и их взаимодействие при достижении критических величин их объемной плотности). Быстро разрастались системы прогностических наблюдений. Большое развитие получили методы регистрации вариаций наклонов и деформаций земной поверхности; уровня и химического состава подземных вод; электросопротивления магнитных и электрических полей; геохимических параметров. Комплексность и широта наблюдений позволили выявить ранее ма-



лоизвестные особенности аномальных изменений геофизических полей, интерпретируемых как “предвестники”. К главным относятся: “пятнистость” проявления аномалий по площади, размеры которой во много раз превышают длину разрыва от соответствующего землетрясения; разнообразие форм проявления аномалий от места к месту и от землетрясения к землетрясению. Среди исследователей постепенно сформировалось обоснованное мнение о том, что источником большинства аномалий не является очаг будущего землетрясения; особенно это относится к краткосрочным предвестникам, появляющимся за несколько суток (или часов) до землетрясения³.

После Таншаньского землетрясения и неудавшегося многолетнего экспери-

мента по прогнозу землетрясения в Паркфилде (штат Калифорния, США) в середине 1980-х гг. в прогностических исследованиях наступил период “отлива” и скептического отношения к возможности решения этой проблемы. В научной печати разгорелась дискуссия о принципиальной возможности прогноза землетрясений. Сторонники невозможности прогноза указывали на хаотичность сейсмического процесса в сложно построенной земной коре; высокую вероятность динамического развития любой трещины – до разрыва большого землетрясения; трудно учитываемое триггерное, подобное “спусковому механизму”, влияние малых внешних возмущений, которые могут привести (а могут и не привести) к макронеустойчивости сейсмоактивного района,

³Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений/ М. : Наука, 1993. 313 с.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники/ М. : Наука, 2003. 270 с.

находящегося в метастабильном состоянии. Более оптимистично настроенные исследователи основывались на экспериментально установленных фактах возникновения предвестников в очаге будущего землетрясения, а также на вероятностном прогнозе катастрофы в условиях детерминированного хаоса. Тем не менее большинство исследователей в разных странах были согласны с тем, что прогресс возможен при условии накопления новых, более обширных и глубоких знаний о многообразных физических процессах, приводящих к землетрясению. Возможно, не последнюю роль в этом сыграло катастрофическое Спитакское землетрясение в Армении, произошедшее 7 декабря 1988 г., – в СССР (а затем – в Российской Федерации) в течение нескольких лет наблюдалось повышенное внимание руководителей страны к проблеме сейсмической опасности.

Более чем двадцатилетняя дискуссия о возможности (или невозможности) прогноза землетрясений завершилась, по-видимому, на 35-ой Генеральной ассамблее Международной ассоциации по сейсмологии и физике недр Земли, проходившей в Кейптауне (Южная Африка) в январе 2009 г., была принята специальная резолюция, подводившая итог представленных

исследований по прогнозу и предсказуемости землетрясений. В ней записано, что «...осознавая возможности, которые предоставляют недавние события в изучении землетрясений, Международная ассоциация по сейсмологии и физике недр Земли рекомендует, чтобы исследования по прогнозу и предсказуемости землетрясений, их аттестации и сравнительному испытанию методов прогноза поддерживались (*научным сообществом*)».

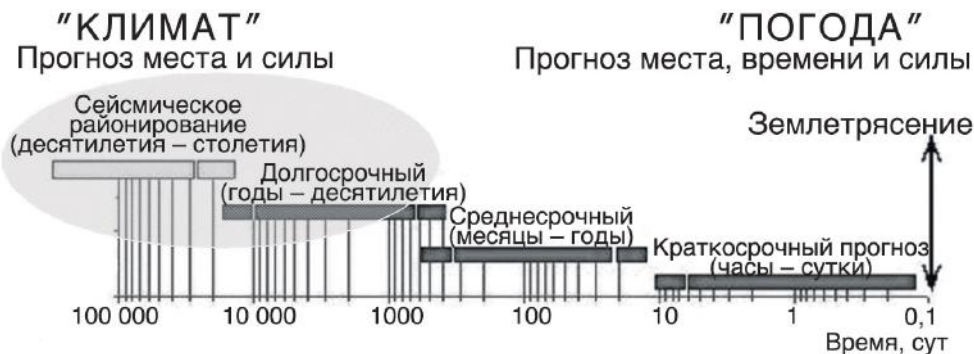
Очевидна важность и актуальность решения задачи прогнозирования землетрясений как части более общей проблемы – уменьшения опасности, сопровождающей природные катаклизмы, и экономических последствий в обществе от их воздействия. Указом Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 г. создание новых методов предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера вошло в Перечень критических технологий Российской Федерации.

ЧТО ТАКОЕ
ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ?

Информация о прогнозе землетрясения должна определять ожидаемый магнитудный диапазон; географическую область, где оно произойдет, и интер-

вал времени, когда оно может случиться с точностью, достаточной для того, чтобы суждение об окончательном успехе (или неудаче) прогноза не вызывало затруднений. Сверх того, ученым следует также определить “доверительный” уровень каждого прогноза. Таким образом, прогноз землетрясения включает три элемента: определение его места, времени и силы (магнитуды).

Для того чтобы узнать место землетрясения, надо иметь сеть наблюдений по площади, которую, прежде всего, создает сейсмическая сеть. Наблюдения за другими геофизическими предвестниками: электрическим сопротивлением, наклонами земной поверхности, ее деформацией, химическим составом подземных вод ведутся, к сожалению, только в отдельных точках сейсмоактивных районов. Какова зона ответственности каждой такой точки наблюдений – оценить очень трудно? Именно поэтому в середине 1980-х гг. в СССР была разработана целевая Программа по созданию сети сейсмических наблюдений для прогноза землетрясений. В ней, в частности, говорилось, что для прогноза землетрясений с магнитудой 5–5,5 и выше (они дают социально значимый эффект – разрушения, гибель людей, разрывы тру-



Типы прогноза землетрясений.

бопроводов) надо иметь сеть наблюдений по всем признакам, распределенную по сетке в масштабе 50 × 50 км. Как уже было отмечено, площадь, составляющая около 28% общей территории РФ, подвержена сейсмической опасности. Для того чтобы “покрыть” эту территорию станциями наблюдений за предвестниками землетрясений (по сетке 50 × 50 км), потребуются огромные материальные затраты.

Во временных рамках прогноз подразделяется на долгосрочный (на десятилетия вперед), среднесрочный (годы), краткосрочный (дни–месяцы) и оперативный (минуты–часы). Следует заметить, что деление это условное. Каждый период прогноза базируется на определенном наборе предвестников геофизических явлений (в основном), опережающих и предвещающих возникновение землетрясения.

Сейсмическое районирование, например, можно сравнить с определением сейсмического климата:

- районы, наиболее подверженные сейсмической опасности, – сейсмические пояса Земли (это сейсмический “юг”, там “жарко”);
- районы, где сейсмичность отсутствует или незначительна (это сейсмический “север”).

О ПРЕДВЕСТНИКАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Прогнозирование ведется по отслеживанию “предвестников” – симптомов, признаков, указывающих на то, что, возможно, в таком-то месте и в такое-то время произойдет сейсмическое событие. К настоящему времени во всем мире насчитывается несколько сотен различных по своей природе предвестников землетрясений, их можно разделить на две группы.

Первая, наиболее многочисленная и наиболее изученная группа – геофизические “предвестники”, связанные с закономерным поведением геофизических полей на разных этапах готовящегося землетрясения. Предвестники этой группы присутствуют практически во всех диапазонах прогноза по времени: от долгосрочного до оперативного.

Вторая группа связана с необычным поведением биологических объектов перед землетрясением. Известно, что поведение животных, птиц, рыб, змей и других биологических объектов меняется перед сильным сейсмическим событием. Эта группа предвестников менее изучена; их можно отнести краткосрочным и оперативным. В свою очередь, геофизические “редвестники” делятся на сейсмические, гидрогеодинамические, деформационные, геохимические, термические, гравитационные, электромагнитные.



Группы предвестников землетрясений.

совместное использование нескольких прогностических признаков; при этом исходят из того, что каждый отдельный “предвестник” отражает ту или иную сторону многогранного (и не до конца ясно) процесса готовящегося землетрясения и не является достаточно информативным, с точки зрения статистики. Поэтому их комплексное использование позволяет повысить надежность и эффективность прогнозных оценок.

Практика последних лет показала оправданность такого подхода, по крайней мере, для среднесрочного (в первые годы) прогноза. Примером успешного прогноза сильного землетрясения с использованием комплекса прогностических признаков и методов служит Симуширское (Средне-Курильское) землетрясение, произошедшее 15 ноября 2006 года.

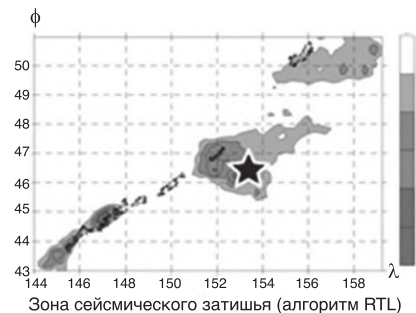
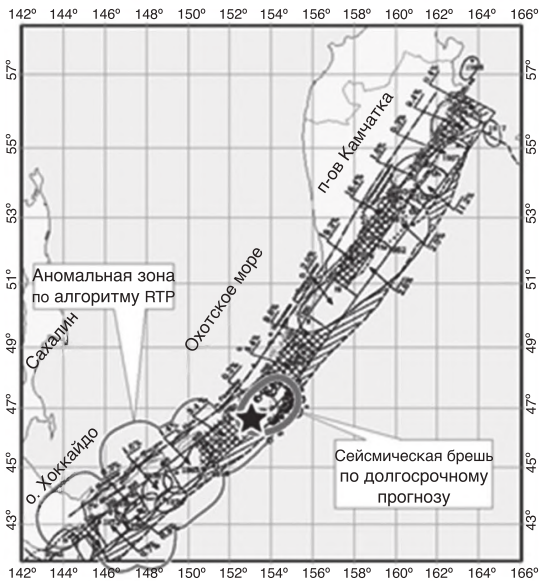
Какими же должны быть наблюдаемые явления, чтобы их можно было бы рассматривать в качестве предвестников землетрясений? Вот они:

- Ясный физический смысл прогностических признаков;
- физическая обоснованность связи каждого прогностического признака с процессом “подготовки” землетрясений;

Несмотря на огромное количество предвестников, ни один из них не дает точных указаний на время, место и силу грядущего землетрясения. В разных сейсмоактивных районах различные предвестники проявляют себя по-разному, создавая большой разброс в оценке места, времени и силы будущего землетрясения. Это связано не только со сложностью самого объекта исследований (очага землетрясения, условий его зарождения и развития; отсутствием количественной теории процесса “подготовки” землетрясения), но и с существенным влиянием помех: их далеко не всегда удается исключить. Поэтому прогноз землетрясений (как и прогноз погоды) имеет вероят-

ностный характер. Следует также заметить, что сообщения о наблюдавшихся предвестниках землетрясений являются, по большей части, единичными, и по ним затруднительно (а порой и невозможно) оценить даже ретроспективно их статистические характеристики: вероятность правильного прогноза, вероятность ложной тревоги, среднее время ожидания землетрясения после появления “предвестника”.

Анализ многолетних данных по ряду геофизических (в основном сейсмологических) “предвестников” показал, что вероятность успешного прогноза по каждому из них не превышает 50%. Одним из возможных выходов из этой ситуации является



Долгосрочный и среднесрочный прогнозы Симуширского (Средне-Курильского) землетрясения, произошедшего 15 ноября 2006 г., $M=8,2$. Слева – карта долгосрочного прогноза с использованием различных методов; справа – график (вверху) и зоны сейсмического затишья (внизу), в соответствии с прогнозом. Звездочками показано положение эпицентра землетрясения: оно произошло в выделенных по проявлениям “предвестников” в аномальных зонах. (Из доклада президента РАН академика Ю.С. Осипова на общем собрании РАН 28 марта 2007 г.)

– подкрепленность каждого прогностического признака данными наблюдений как во времени (долговременные ряды значений прогностических признаков), так и в пространстве (возможность их картирования);

– наличие формализованной процедуры выделения аномалий прогностических признаков, основанной на модели их поведения в период “подготовки” землетрясения;

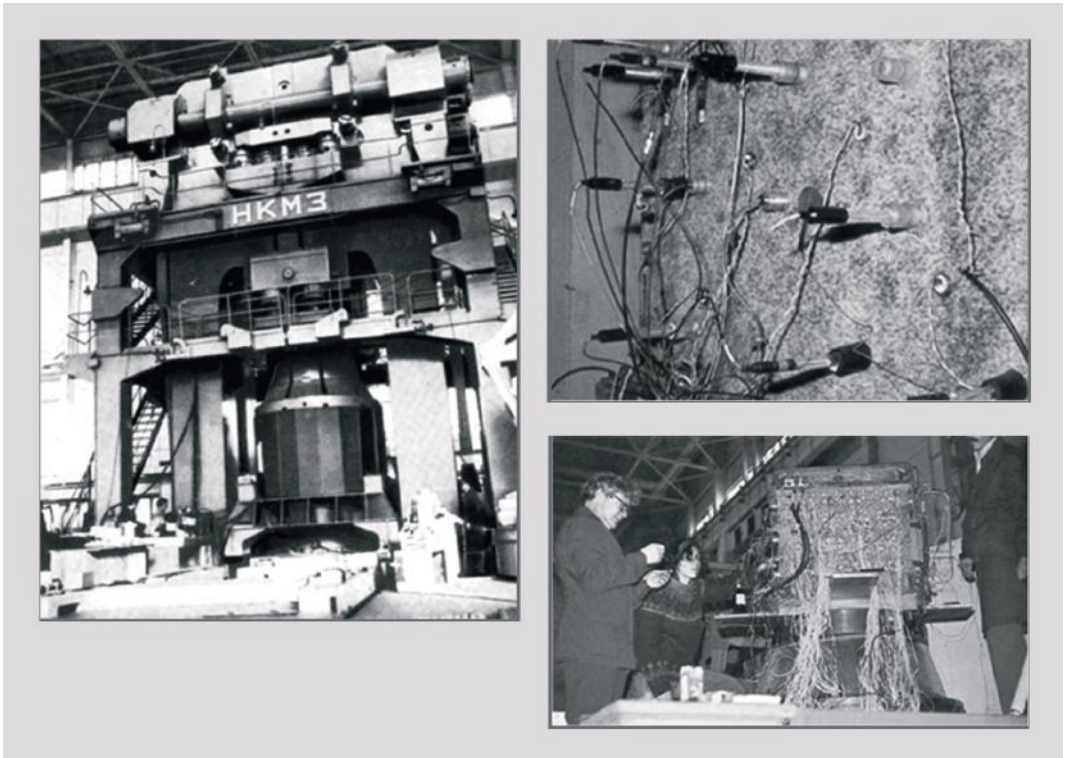
– возможность оценки ретроспективных (по результатам предшествую-

щих наблюдений) статистических характеристик каждого “предвестника”: вероятности успешных прогнозов (вероятности обнаружения), вероятности ложных тревог, прогностической эффективности (информативности).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Помимо наблюдений за изменениями разных геофизических полей в натурных (или в полевых условиях), ученые широко используют для изучения

процесса формирования очага будущего землетрясения прием лабораторного моделирования. В качестве моделей сред, в которых “готовится” землетрясение, при этом используются образцы горных пород различного происхождения, обладающие различными физическими свойствами, а также искусственные модельные материалы: чаще всего цемент с различными наполнителями в виде песка, гранитной крошки различного гранулометрического состава. Роль машины,



Подготовка образца к эксперименту по моделированию очага землетрясения на Большом прессе (осевое усилие – 50 тыс. т) в Институте физики высоких давлений РАН (Троицк, 1985 г.). Справа вверху – одна из граней испытуемого образца с наклеенными датчиками; внизу – общий вид образца, подготовленного к эксперименту. Фото Г.А. Соболева.

создающей условия, существующие в глубине земных недр, в этих случаях выполняет механический пресс с обратной связью. С его помощью можно давать на образец одно-, двух- и трехосную нагрузку. В некоторых экспериментах для приближения к условиям, в которых горные породы находятся в земных недрах, вокруг исследуемого образца, помещенного в специальное устройство (“бомбу”), создается всестороннее давление.

Основываясь на результатах многолетних наблю-

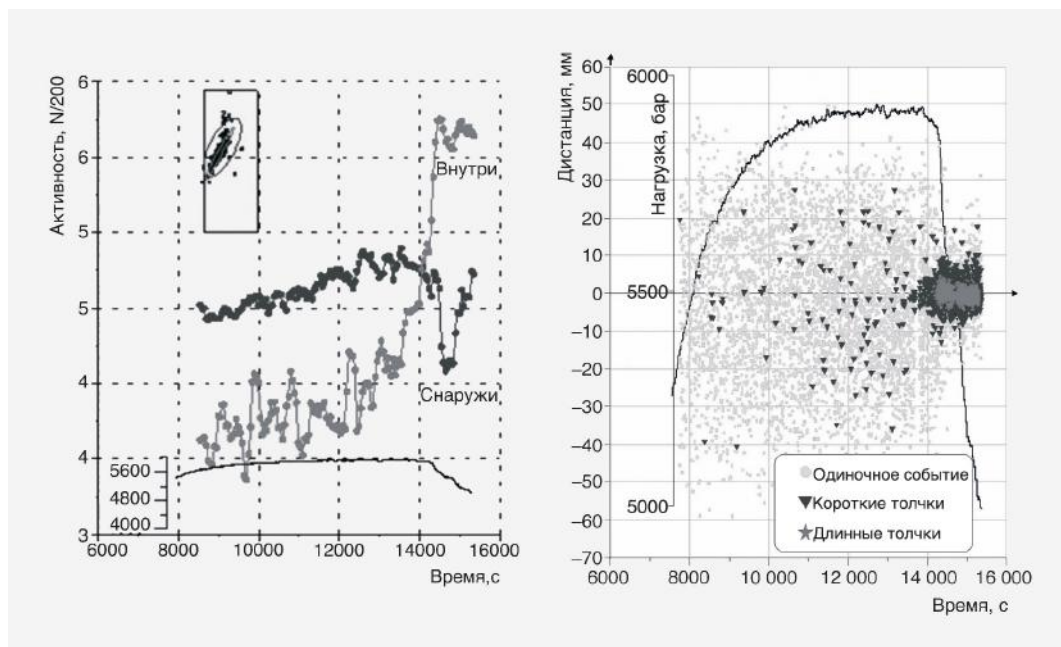
дений за сейсмической активностью и на лабораторных экспериментах, член-корреспондент РАН Г.А. Соболев предложил концепцию прогноза землетрясений. Согласно этой концепции, будущее землетрясение в процессе “подготовки” проходит ряд последовательных стадий, развивающихся в пространстве и во времени, каждой из которых присущи свои черты и характерные признаки условий, при которых может произойти землетрясение.

ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Какие же трудности выделяют ученые, занимающиеся прогнозом землетрясений? Их, как минимум, две.

Первая: сейсмичность – одна из разновидностей процессов, протекающих в неравновесных системах (а земные недра – это неравновесная система). Отсюда следует неоднозначность прогноза катастрофы.

Вторая: неоднородность напряженного состояния



Результаты лабораторных экспериментов по моделированию очага землетрясения. Графики изменения акустической эмиссии во времени и в объеме образца: слева – к моменту его разрушения акустическая активность разная: вблизи зоны будущего разрыва (очага землетрясения; кривая в центре) и вне ее (кривая, идущая сверху вниз); справа – ближе к моменту разрушения увеличивается количество групповых акустических событий (темные треугольники и звездочки), тяготеющих к зоне разрыва. По данным Г.А. Соболева, А.В. Пономарева, (2003 г.)

и прочности в литосфере приводит к одновременному существованию многих метастабильных областей, в каждой из которых может произойти землетрясение; но время возникновения землетрясения определяется малыми воздействиями разных физических полей (триггерами). Отсюда неизбежен пропуск целей и невысокая вероятность успешного краткосрочного прогноза.

Так можем ли мы прогнозировать землетрясения? Отвечая на этот вопрос, можно пойти двумя путями. Первый: поскольку

наши знания о процессах, предшествующих возникновению землетрясения еще неполны и недостаточно адекватно его отражают, то землетрясения предсказывать мы не можем. Надо дожидаться того момента, когда эти знания станут полными и только тогда приступить к действительным прогнозам землетрясений.

Второй путь: при накопленном в настоящее время объеме знаний о процессе “подготовки” землетрясения, условиях, предшествующих его возникновению и известных “пред-

вестниках” и алгоритмах прогноза, все же пытаться делать такие прогнозы, получая таким образом новые знания и накапливая опыт прогнозов. Автор придерживается второго пути.

Из этого вытекает вывод: с целью накопления опыта мы уже сейчас можем перейти от описания отдельных “предвестников” к систематическому научному прогнозу сильных землетрясений ($M \geq 5,5$) с использованием комплекса прогностических, физически обоснованных признаков и соответствующих методик.



Концепция прогноза землетрясений, по Г.А. Соболеву. Будущее землетрясение в процессе “подготовки” проходит ряд последовательных стадий, развивающихся в пространстве и во времени, каждой из которых присущи свои черты и характерные признаки.

падных специалистов, показывающие, что число погибших в результате землетрясений выше в тех странах, где высока коррупция в строительной отрасли⁵. Из всех смертельных исходов при землетрясениях, связанных с разрушением зданий за последние три десятилетия (с 1980 по 2010 гг.), 82,6% зафиксировано в государствах, в которых высок уровень коррупции.

О КАЧЕСТВЕ СТРОИТЕЛЬСТВА

Теперь давайте зададимся вопросом, что важнее: спрогнозировать сильное землетрясение или хорошо и качественно построить здание (с учетом силы ожидаемых сейсмических воздействий)? Среди сейсмологов бытует выражение: “Не землетрясения убивают людей, а здания”. Прогнозировать землетрясения мы не научимся

еще очень долго – надо просто хорошо строить. “Жизненно важно не предсказать точное время, когда будет разрушен город, а построить его там и так, чтобы он не был разрушен”⁴.

И снова зададимся вопросом: что мешает качественному строительству? Известны исследования за-

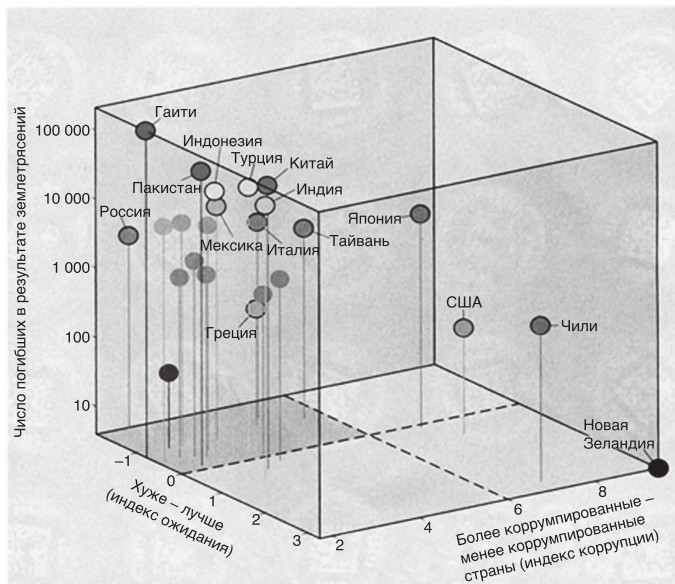
Обрушение недостроенного 13-этажного здания в Шанхае (Китай). Следует обратить внимание на то, что при обвале здание не рассыпалось на составные элементы (как это бывает при низком качестве строительства), а осталось целым. Фото информгентства “Синьхуа”, 27 июня 2009 г.



⁴Солоненко В.П. Сейсмология и проблемы предсказания землетрясений // Геология и геофизика, 1974. № 5. С. 168–178.

⁵Ambraseys N., Bilham R. Corruption kills // Nature, 2011. V. 469. P. 153–155.

Гистограмма, на которой отражена связь уровня коррупции в строительной отрасли в указанных странах с количеством погибших в результате землетрясений. В левой угловой части рисунка обозначены наиболее коррумпированные страны. По данным Ambraseys, Bilham, 2011 г.



Итак, проблема прогноза землетрясений (несмотря на положительные результаты, полученные в последние десятилетия) еще очень далека от своего решения. Вполне вероятно, что надежные и полезные прогнозы не появятся еще много лет – настолько сложна эта задача, требующая больших сил и средств; даже в самых развитых странах их недостаточно. С другой стороны – успешные прогнозы не избавят человечество от землетрясений, они будут причинять ущерб зданиям и сооружениям. Кроме того, даже в случае надежного прогноза можно ли будет осуществить полную эвакуацию населения таких мегаполисов как Токио, Сан-Франциско, Пекин?

Эффективным способом борьбы с разрушительными эффектами, сопровождающимися землетрясениями, должно быть

сейсмостойкое строительство новых объектов и укрепление старых зданий до такой степени, чтобы они смогли выдерживать натиск стихии. Хотя, как показывает печальный опыт землетрясения, произошедшего 16 января 1995 года в г. Кобэ (Япония), даже высокий уровень антисейсмического строительства не способен полностью избавить современный город от огромных прямых и косвенных потерь.

нужно ли ПРОГНОЗИРОВАТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ?

Правомерен вопрос: для чего тогда нужно вооб-

ще прогнозировать землетрясения? Общество (а конкретный человек – тем более) не может жить и быть постоянно готовым к землетрясению: со временем чувство опасности притупляется. И тогда действительный, статистически оправданный прогноз будет сигналом к приведению в повышенную готовность отрядов спасателей; отключению газо- и нефтепроводов; остановке экологически вредных производств, находящихся на опасной территории. Выполнение этих и других организационно-технических мероприятий позволит снизить прямые и косвенные убытки в том случае, если землетрясение произойдет.

КТХ: галактическое скопление

В мае 2018 г. с помощью Космического телескопа им. Хаббла получено изображение Сверхскопления Девы (Virgo Supercluster), на заднем плане которого находится скопление галактик SDSS J0333+0651 (см. стр. 4 обложки). Оно получено в рамках обзора, целью которого было исследование процессов звездообразования в протяженных галактиках. Области рождения новых звезд, как правило, – не очень большие: они составляют всего несколько сотен световых лет, поэтому новые звезды трудно обнаружить на больших расстояниях от Земли за счет гравитационных линз. Древние скопления – такие, как это: образовавшиеся в первые сотни миллионов лет после Большого взрыва – могут помочь астрономам больше узнать о начальных этапах эволюции Вселенной.

Известно, что галактики в космическом пространстве не распределяются случайным образом, а собираются вместе в группы под действием гравитации. Например, Млечный Путь является

членом Местного Скопления галактик (Local Group), входящего в Сверхскопление Девы (Virgo Supercluster), которое, в свою очередь, представляет собой часть другого гигантского образования, содержащего до 100 тыс. галактик – сверхскопления Ланиакея (Laniakea) размером 520 млн св. лет и массой $10^{21} M_{\odot}$ (находящееся на расстоянии 160 Мпк от нас). Недавнее открытие огромного образования Ланиакея (в переводе с гавайского "необъятные небеса") позволило точно определить границы нашей Местной группы галактик, а также установить не понятные ранее взаимосвязи между различными скоплениями галактик.

Сверхскопления галактик являются самыми большими структурами во Вселенной; они составлены из галактических групп, подобных нашей, Местной группе, содержащей десятки различных галактик, а также массивных скоплений; они, в свою очередь, содержат сотни галактик, связанных друг с другом галактическими "нитеями" (филаментами). И, хотя эти структуры связаны друг с другом, но их границы плохо устанавливаются. Для того, чтобы лучше понять распределение сверхскоплений в космическом пространстве, ученые предложили новый способ оценки этих крупно-

масштабных структур – он основывается на их влиянии на движение галактик: галактика, находящаяся между двумя сверхструктурами, является космическим "канатом", перетягивающим к себе сверхскопления. В связи с этим баланс гравитационных сил от окружающих крупномасштабных структур будет полностью определять движение этой галактики. С помощью радиотелескопа Грин-Бэнк Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США) и других наземных астрономических инструментов была создана Карта скоростей движения галактик местной Вселенной. Астрофизики смогли определить области пространства, в которых доминирует та или иная группа сверхскоплений. Это исследование так же объясняет роль Великого аттрактора (Great Attractor) – гравитационного центра притяжения в межгалактическом пространстве; оно влияет на движение Местной группы и других галактических групп. Определено, что Великий аттрактор и Сверхскопление Девы входят в Сверхскопление Ланиакея.

*Пресс-релиз
ESA/STScI и NASA,
25 мая 2018 г.*