

В. В. РУЖИЧ, С. Г. ПСАХЬЕ

БРОСИТЬ ВЫЗОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЮ

Каким маленьким и слабым предстает человек перед землетрясением — грозным проявлением несокрушимой и неуправляемой природной стихии. Но так ли это на самом деле? Маленький и слабый, в новом тысячелетии человек учится двигать горы...

Человечество издавна пыталось противостоять землетрясениям. Однако до сегодняшнего времени борьба эта сводилась, в конечном счете, лишь к смягчению их катастрофических последствий. Ни сейсмическое районирование, ни сейсмостойкое строительство, ни совершенствование спасательных работ, так же как и достаточно скромные достижения в прогнозе землетрясений, не позволили добиться заметного снижения ущерба от сейсмической стихии.

Очевидно, что в ближайшем будущем достоверный краткосрочный прогноз землетрясений останется по-прежнему недостижимым. Поэтому в последние десятилетия ученые из разных стран стали задумываться о возможности альтернативных, более радикальных и эффективных, подходов к снижению сейсмического риска.

Как возникают землетрясения

Земная кора разбита на многочисленные блоки малых, больших и гигантских размеров, разделенные разрывами, соизмеримыми с ними по масштабам. Самые большие из последних в геологии принято называть *разломами*. Этот факт дает основание с позиций механики отнести земную кору к разряду так называемых *разломно-блоковых* сред. Практически все часто повторяющиеся геологические явления деформации земной коры во многом определяются различными процессами, происходящими именно в граничных участках, т. е. в трещинах и разломах.

Сегодня большинство ученых сходится во мнении, что землетрясения возникают в результате быстрых эпизодических смещений «берегов»

На фото слева — след алтайского землетрясения 2004 г.
Фото Е. Высоцкого



РУЖИЧ Валерий Васильевич — доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). Область научных интересов: физика очагов землетрясений, механика разломообразования, прогноз землетрясений, физические и натурные эксперименты



ПСАХЬЕ Сергей Григорьевич — доктор физико-математических наук, директор Института физики прочности и материаловедения, председатель ТНЦ СО РАН (г. Томск). Область научных интересов: прочность и пластичность гетерогенных сред, механика разломно-блоковых сред, математическое моделирование

разломов. Скорости смещений при этом могут достигать 10 м/с и более. Вибрации крыльев разломов, возникающие при быстрых смещениях, возбуждают колебания масс горных пород в широком диапазоне, которые распространяются в виде упругих волн. В диапазоне частот 1–15 герц они нередко оказываются губительными, проявляясь на земной поверхности в виде катастрофических землетрясений, особенно если сопровождаются почти мгновенным образованием *сейсмодислокаций* — зон протяженных трещин.

Подчеркнем, что источник возбуждения сильных сейсмических колебаний возникает в зонах разломов только при очень быстрых движениях, что, к счастью, случается не часто. В продолжительных промежутках между эпизодами быстрых движений в разломах также отмечаются перемещения, но

очень медленные, в так называемом *режиме вязкого течения* или *тектонического крипа* («крип» означает «ползти») со средней скоростью 0,1–10 мм в год.

Причинами тектонического деформирования разломно-блоковой системы земной коры являются физико-химические процессы, идущие в недрах нашей планеты, а также действие на нее (как на космическое тело Солнечной системы) внеземных энергетических источников. В результате в земных недрах накапливается тектоническая энергия, небольшая часть которой

В виде разрушительных землетрясений выделяется лишь небольшая часть энергии, накопленной в недрах благодаря деформациям земной коры



(1–5%) и выделяется в виде разрушительных сейсмических колебаний при очень сильных землетрясениях. Образовавшиеся при этом сейсмодислокации могут, в свою очередь, сами разрушать жилые и хозяйственные объекты, а также приводить к таким экологическим катастрофам, как сели и обвалы.

Помог «Сдвиг»

Таким образом, земная кора, как и другие глубокие слои Земли, напряжена и таит в своих недрах огромный запас тектонической энергии, малая часть которой выделяется в виде волновых колебаний при внезапных ускоренных смещениях берегов разломов. И здесь возникает «крамольная» мысль: а что если научиться каким-то образом управлять движениями в опасных фрагментах разломов?

Именно такой идеей в течение последних одиннадцати лет и руководствовались авторы вместе со своими коллегами. Важную роль в ее разработке сыграло создание высокоточного измерительного комплекса «Сдвиг», предназначенного для прямой фиксации движений в сейсмоопасных разломах. Первый его образец с датчиком индукционного типа был сконструирован в 1994 г. в иркутском Институте земной коры СО РАН, а затем испытан во фрагменте зоны одного из разломов на полигоне вблизи п. Слюдянка.



Через год был разработан оригинальный датчик кольцевого типа. Новый измерительный комплекс был установлен во внутренних участках Ангарского сейсмоактивного разлома, благодаря чему удалось в течение многих лет следить за движениями в нем с высокой (около 1–2 мкм) точностью.

Первые же результаты, полученные на полигоне в п. Листвянка, удивили. В частности, было обнаружено, что движения во внутренних участках разлома происходят непрерывно и имеют сложный возвратно-поступательный характер, определяющийся рядом факторов: колебаниями температуры, ветровой нагрузкой, изменениями атмосферного давления и влажности, сейсмическими сотрясениями от близких сильных землетрясений и, конечно же, медленными тектоническими деформациями, которые обычно выявляются лишь при длительных наблюдениях.

Ключевым моментом в ходе исследований явилось установление высокой «чувствительности» трещин и, соответственно, самого Ангарского разлома к внешним воздействиям на горный массив (Ружич, Трусков, Черных и др., 1999). В ходе дальнейшего мониторинга с использованием более совершенной аппаратуры было обнаружено, что даже слабые (с энергией 500–1000 Дж) динамические ударные воздействия на горный массив — иерархически упорядоченную блочную систему — способны вызывать заметное изменение режима

Карта прогноза землетрясений в Байкальском регионе на 2000–2050 гг., на которой также отмечены эпицентры землетрясений, реально произошедших в регионе с 1999 г. Наиболее значимые из последних произошли в местах, где были предсказаны сильные сейсмические события.

Авторы-составители: В. В. Ружич, Е. А. Левина, Р. М. Семенов (1999 г.)

-  эпицентры возможных землетрясений с разной энергией в 2000–2050 гг., пунктиром обозначены области с интенсивностью сотрясений предположительно от 7 до 10 баллов;
-  реальные землетрясения с интенсивностью сотрясений от 5 до 8 баллов, произошедшие с октября 1999 г. по сентябрь 2006 г.

смещений по границам блоков, т. е. трещинам. Характер отклика на воздействия зависел и от способа приложения динамической нагрузки. Реакция на воздействия могла быть как мгновенной, так и отсроченной, но при этом ярко выраженной и длительной. Период отсрочки составлял от нескольких минут до суток и более.

Это было новым. Последующие натурные эксперименты — как на Ангарском разломе, так, позднее, и на других — доказали, что на режим смещений разломов, их скорость или направленность можно влиять техногенными воздействиями.

На территории астрофизической обсерватории Института солнечной и земной физики СО РАН в п. Листвянка расположен фрагмент зоны Ангарского сейсмоактивного разлома, удобный для геофизического изучения.

- I — Главный Саянский разлом;
- II — Приморский;
- III — Хамардабанский;
- IV — Ангарский

Вода и огонь

На факты возникновения слабых землетрясений при закачках жидкости в горный массив ученые обратили внимание давно. Например, в Денвере в 1964 г. американские специалисты закачали в глубокие скважины жидкие отходы, что вызвало вспышку сейсмической активности в виде серии многочисленных, но слабых землетрясений, возникших на глубинах 4–8 км.

Так было установлено, что проникновение жидкости в глубокие горизонты земной коры может приводить

к активизации движений по трещинам и разломам. Это в свою очередь вызывает уменьшение избыточных напряжений в земной коре на фоне многочисленных гидравлически инициированных смещений в трещинах. Этот процесс обычно сопровождается большим числом слабых сейсмических толчков.

В 1997 и 2000 гг. японские ученые провели тщательно спланированные эксперименты по изучению влияния воды, закачанной в разлом Нойима (с ним связано разрушительное землетрясение в январе 1995 г.). Эти действия также привели к возникновению в течение

нескольких дней многочисленных слабых сейсмических толчков, гипоцентры которых фиксировались на глубинах 4 км и более — намного глубже уровня, на который закачивалась вода. Проникновение воды в трещинно-поровое пространство горной породы привело к увеличению порового давления и уменьшению напряжений в зоне разлома. Заливка жидкости способствовала также запуску механизма «ползучести», что обеспечивало плавное и постепенное высвобождение энергии недр через активизацию смещений по трещинам (Nishigavi et al., 2002).

Уникальный измерительный комплекс «Сдвиг-ЗМ», позволяющий с высокой точностью фиксировать движения в сейсмоопасных разломах. Эта последняя модификация разработана в томском Институте физики прочности и материаловедения СО РАН

Сверхглубокий (более 500 м) карьер «Удачный» (Республика Саха), на котором проводятся массовые промышленные взрывы для добычи алмазов, стал для ученых из Института земной коры СО РАН моделью для изучения влияния высокоэнергетических воздействий на сейсмоактивные разломы



Сибирская команда «охотников за землетрясениями» в конце очередного экспедиционного сезона. Август 2005 г., Листвянка



Судя по этим примерам, для безопасного снижения избыточных напряжений в очагах будущих землетрясений не требуется бурить скважины до глубин 15–20 км. Более того, в недрах земной коры содержится немало подземных водоносных систем, и можно попытаться перенаправить их в нужное «русло».

Оценить сеймотектонические эффекты других видов воздействий на разломы — высокоэнергетических — позволили данные испытаний подземных ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне и в штате Невада (США). Взрывы с мощностью в десятки-сотни килотонн, проводившиеся на невадском полигоне в скважинах километровой глубины, вызывали смещения в виде свежих трещин протяженностью во многие километры в зонах близлежащих разломов.

Подобные подземные взрывы иногда провоцировали и землетрясения, энергия которых, как правило, была примерно в 100–1000 раз меньше, чем энергия самих взрывов. Динамическое воздействие таких взрывов, очевидно, способствует разгрузке избыточных напряжений в земной коре, что и выражается в виде умеренных по силе землетрясений. Тем самым предотвращается

более сильное и опасное готовившееся сейсмическое событие (Тарасов, Тарасова, 1995). Поэтому в районах испытаний обычно наблюдается заметное снижение энергетического уровня землетрясений.

«Прививка» от землетрясения

В качестве способов воздействия на разломы авторы и их коллеги использовали бурение скважин, удары копра (установки для забивки свай), промышленные взрывы, заливку воды через скважины и т.п. В том числе была обнаружена отчетливо выраженная реакция Ангарского разлома на ветровые колебания 25-метровой вышки солнечного вакуумного телескопа во время шторма в сочетании с «дождевым обводнением».

Действие массовых промышленных взрывов изучалось на сверхглубоком карьере «Удачный» в Республике Саха, где глубина открытой выработки достигает 560 м, а вес зарядов взрывчатых веществ измеряется десятками тонн.

Силу готовящегося землетрясения можно ослабить, закачав воду или проведя серию направленных взрывов

Подобного рода натурные испытания, но уже с малыми весовыми зарядами взрывчатых веществ, проводились и на других разломах Восточной Сибири, а также на сейсмогенных трещинах протяженностью в сотни километров в Монголии, где только в прошлом столетии произошло четыре сильнейших землетрясения.

Нужно заметить, что при взрывном способе разгрузки все же существует риск, пусть и небольшой, вызвать быструю подвижку и спровоцировать землетрясение, особенно если его очаг уже готов к разрядке. Поэтому более безопасным и контролируемым способом, очевидно, является разгрузка с помощью менее сильных, но частых и продолжительных вибрационных воздействий. К сожалению, современные вибраторы, работающие на поверхности, мало пригодны для этих целей, потому что генерируемые ими упругие колебания, быстро рассеивающиеся с глубиной, оказывают лишь слабые динамические воздействия на глубинные части разломов. Необходимо создать новые конструкции вибраторов, и над решением этой задачи уже работают российские специалисты.

Эффективность управления движением в активных разломах можно значительно повысить, если использовать комбинированный способ воздействия,

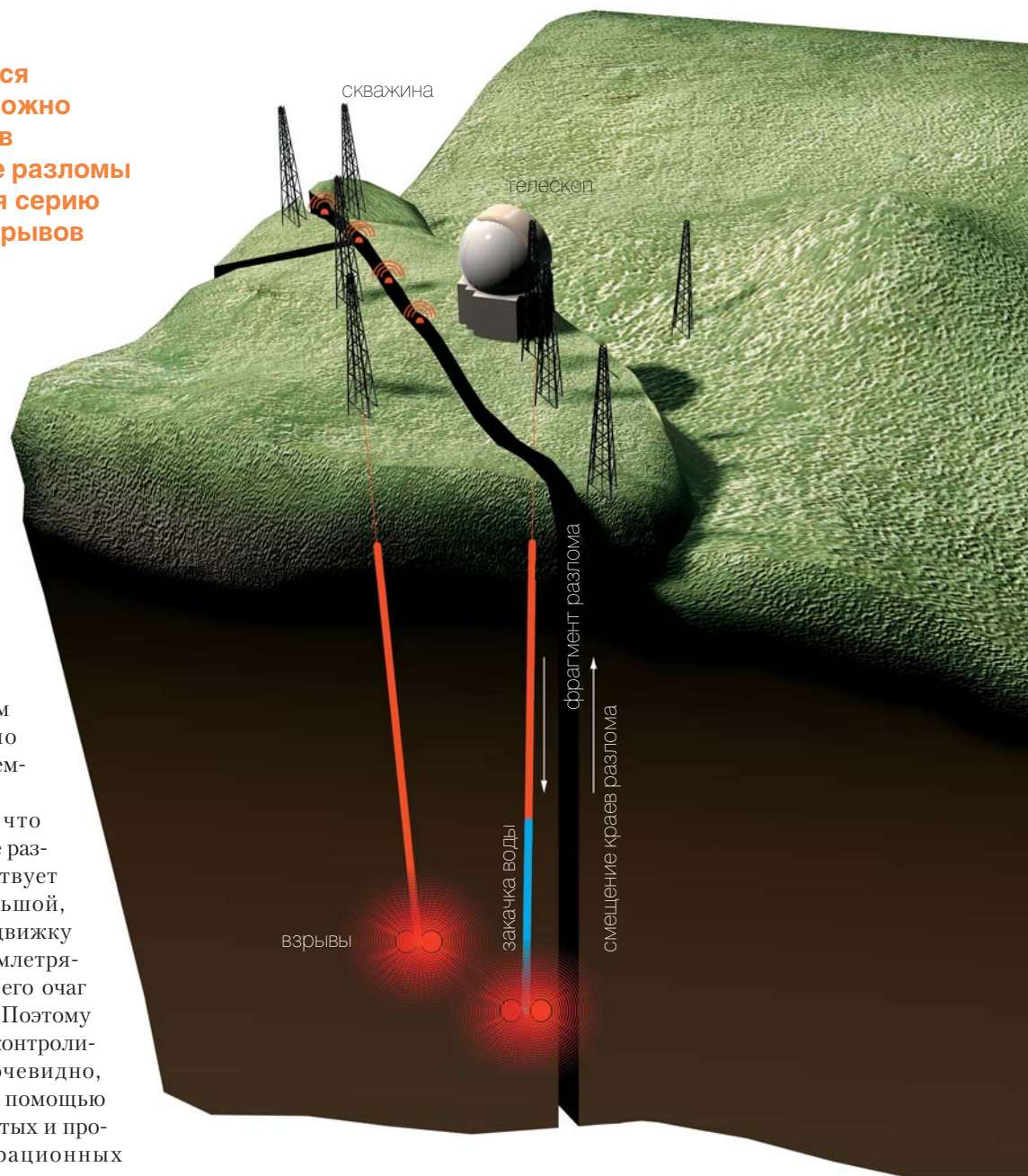


Схема эксперимента по смещению краев разлома на полигоне в п. Листвянка. В качестве техногенных воздействий использовались: вибрации от вышки телескопа в шторм и от бурового станка при бурении скважин, закачка воды, взрывы

а именно — сочетать вибрационные и/или виброимпульсные (взрывные) воздействия с нагнетанием в глубинные фрагменты разломов водных растворов.

Результаты натурных экспериментов, проведенных на полигоне в п. Листвянка в зоне Ангарского разлома в 2004—2006 гг., дали в этом смысле весьма оптимистичные результаты. Например, в 2004 г. за несколько дней удалось достаточно плавно сместить берега разлома примерно на сантиметр в направлении сбросо-сдвигового движения. В естественных условиях при скорости тектонического крипа около 0,05—0,08 мм/год на это понадобились бы многие десятилетия! Такое спровоцированное смещение привело к значительной разгрузке тектонических напряжений в горном массиве.

В августе 2006 г. на том же полигоне были проведены испытания вибрационной системы принципиально нового типа, разработанной в московском Институте динамики геосфер РАН под руководством Г. Г. Кочаряна. Это устройство работает на принципе взрывания воздушно-газовой смеси в скважине, пробуренной в зоне разлома и заполненной водой. Энергия детонационной волны в скважине оказывает мощное ритмичное воздействие на горный массив и на разлом. Испытания показали, что такие вибраторы, при условии их дальнейшего совершенствования, как нельзя лучше подходят для управления режимами смещений в активных разломах.

На основе экспериментальных данных, собранных в течение десятилетия, у нас появилось твердое убеждение: управлять движениями в разломах с помощью техногенных воздействий можно! И в 2006 г. на изобретение «способа управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов» был получен патент Российской Федерации.

Изучать, чтобы управлять

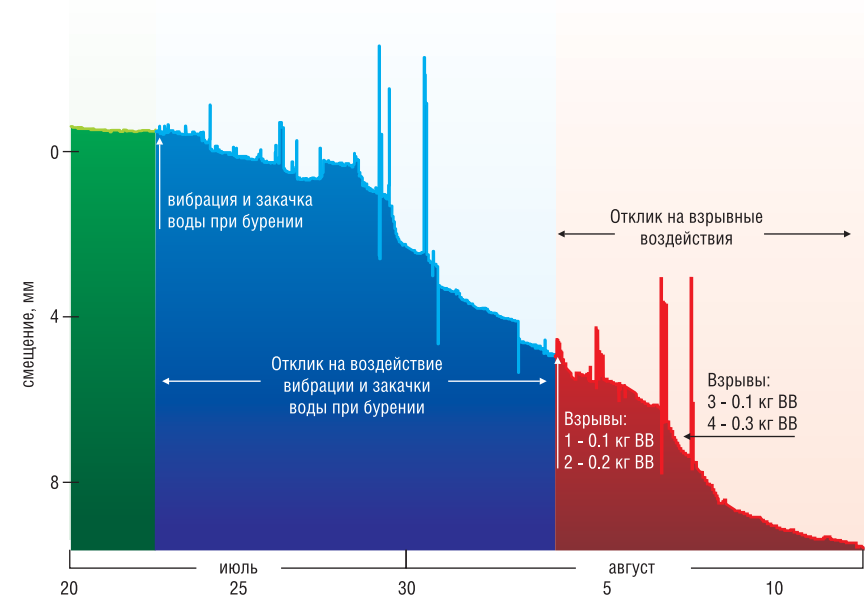
Конечно же, у многих читателей возникли закономерные вопросы относительно возможностей такого необычного подхода: одно дело управлять движениями во фрагментах разломов с протяженностью в десятки метров вблизи земной поверхности, и другое — проводить подобные мероприятия на фрагментах разломов большой глубины и с длинами в десятки километров! Ведь в Прибайкалье, например, очаги сейсмических толчков обычно располагаются на глубине 10—25 км, где температура достигает 300—700 °С, а давление — 3—7 тыс. атмосфер.

Еще один важный вопрос: какие энергетические источники нужно использовать для эффективного воздействия на глубинные фрагменты разломов, чтобы вызвать смещения с амплитудой хотя бы в десятки

сантиметров? Ведь даже такие относительно небольшие смещения уже могут быть достаточны для уменьшения риска возникновения опасного сейсмического события на ближайшие десятки-сотни лет. Кроме того, необходимо понять — не спровоцируем ли мы своими воздействиями преждевременное наступление сильного землетрясения, уже подготовленного природой? И, наконец, — насколько обнаруженные закономерности являются общими, каковы их управляющие параметры?

Проблемы, связанные с ограниченностью наших знаний о глубинных сеймотектонических процессах, могут быть решены с использованием аналитических методов. Подобные работы ведутся в рамках совместного проекта Института земной коры СО РАН и Томского Института физики прочности и материаловедения СО РАН. С помощью разработанных там тео-

Впервые в мировой практике с помощью техногенных воздействий удалось сместить почти на сантиметр края фрагмента разлома на глубине свыше 12 метров (п. Листвянка, 2004 г.). Эксперимент доказал принципиальную возможность управления движением сейсмоопасных разломов





Наиболее безопасный способ управления землетрясениями — разгрузка накопившейся тектонической энергии с помощью не очень сильных, но продолжительных вибрационных воздействий

Каким же образом «борцы с землетрясениями» могут узнать о том, где готовится сильное сейсмическое событие? У специалистов во многих случаях имеются сведения о местоположении очагов готовящихся землетрясений, которые угрожают мегаполисам, атомным станциям, напорным плотинам и другим объектам, неизвестным остается лишь точное время их возникновения.

Однако стратегия упреждающих техногенных воздействий, предлагаемая нами, и не требует достоверного краткосрочного прогноза опасного сейсмического события — чтобы воздействовать на очаг землетрясения, нет нужды дожидаться его окончательного «созревания» и тектонического «финала».

Есть природные катастрофы, и есть природные процессы. Первые в значительной мере являются показателем консерватизма человеческого мышления, недостаточного понимания сути последних.

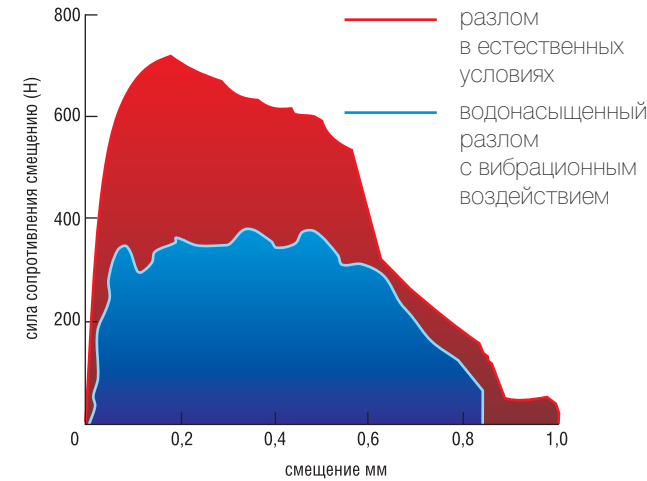
Если мы знаем о причинах и параметрах приближающейся природной катастрофы, то научиться ее предотвращать необходимо.

локальных напряжений в зонах сейсмически активных разломов. Этот подход позволяет также оперативно оценивать ситуацию в ходе испытаний по управляющему воздействию на разломы.

На сегодня разработана конкретная схема техногенных мероприятий по управляющему воздействию на опасные фрагменты разломов. Она предусматривает постоянный контроль над изменениями режима деформаций в разломах, что позволяет при необходимости своевременно вносить в процесс коррективы.

Скважинный генератор сейсмических волн — вибрационная система принципиально нового типа. п. Листвянка, 2006 г.

ретических моделей и результатов компьютерных экспериментов, проведенных на основе метода подвижных клеточных автоматов (Псахье и др., 2000; Psakhie et al., 2001), удалось не только показать общность полученных закономерностей, но и впервые теоретически обосновать принципиальную возможность техногенного снижения



На графике — результате компьютерных экспериментов — показана зависимость силы сопротивления крыльев разлома от величины «навязанных» смещений соседних блоков (как естественной, так и техногенной природы). В случае «обычного» разлома рост силы сопротивления происходит до некоторого критического значения, а затем происходит срыв, соответствующий сейсмическому удару. Если же на разлом воздействовать вибрацией в сочетании с обводнением, то график силы сопротивления будет представлять собой достаточно гладкое плато с незначительными колебаниями: накопленная энергия недр будет выделяться в так называемом режиме ползучести без катастрофических сейсмических событий

Человечество уже сейчас способно осуществлять достаточно эффективные воздействия на сейсмически опасные зоны, которые способны освободить недра Земли от избытка накопленной тектонической энергии. Важно осознать, что эта возможность реальна, и действовать совместными усилиями в рамках международных проектов.

Хочется отметить, что ученые и государственные структуры таких стран, как Монголия, Иран, Германия и Япония, уже заинтересовались разработанным в Сибири способом предотвращения сильных землетрясений. Значит, впереди — новые масштабные эксперименты и новые открытия на долгом и трудном пути к контролю над стихией, до сих пор остающейся непокоренной.

В публикации использованы фотографии В. Ружича

Геолого-геофизическое обследование зоны

Геологическое изучение зоны	Геофизическое изучение зоны	Выбор объекта воздействия
-----------------------------	-----------------------------	---------------------------

Изучение параметров отклика активными методами для выявления состояния разлома или его фрагментов

Инструментальные измерения современных смещений
Взрывное воздействие
Вибрационное воздействие
Закачка водных растворов

Построение геодинамического портрета в виде базы данных разлома или его фрагмента

Построение компьютерной модели разлома или его фрагмента

Выбор оптимальных параметров и вида техногенного воздействия на разлом с целью перевода смещений зоны разлома в режим вязкого сдвигового течения

Проведение мероприятий управляющего техногенного воздействия на разлом или его фрагмент (вибрации, взрывы, закачки)

Контроль параметров отклика на воздействие. Оценка эффекта воздействия в ходе мониторинга

Схема управления деформациями во фрагментах сейсмоопасных разломов — реальная заявка на контроль над землетрясениями