

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Гуфельд И.Л. – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Аннотация. Рассмотрены геологические факторы, контролирующие процессы подготовки сильных землетрясений и проявление слабой и сильной сейсмичности. Выделены процессы взаимного смещения блоков литосферы и дегазации. Обсуждаются три сценария развития сейсмо-тектонических процессов, учитывающих пространственное протекание физико-химических реакций в твердой фазе и флюиде. Подготовка очагов сильных коровых землетрясений связывается с блокировкой границ блоков за счет физико-химических реакций. Рассмотрена возможность регулирования сейсмического режима.

PHYSICAL-CHEMICAL MECHANICS OF STRONG CRUST EARTHQUAKES. SCENARIO OF SEISMOTECTONIC PROCESS DEVELOPMENT

Gufeld I.L. – *The O.Yu.Smidt Institute of the Earth Physics, RAS, Moscow*

Abstract. Geological factors, controlling the process of strong earthquakes preparation and manifestation of weak and strong seismicity, were considered. Processes of mutual displacement of lithosphere blocks and degassing were distinguished. Three development versions of seismotectonic processes, taking into account spatial progress of physical-chemical reactions in hard phase and in fluid, are discussed. Preparation of strong crust earthquake centers is bound up with blocking of block boundaries owing to physical-chemical reactions. Possibility of seismic regime control was considered.

В настоящее время сформулированы два подхода к прогнозу сильных коровых землетрясений. В первом – представления о подготовке и разрушении лабораторных монолитных образцов переносятся на условия литосферы и анализируется двухстадийная модель подготовки разрушения [18]. Второй подход объединяет геологоморфологические методы выделения сейсмогенных структур с методами статистики и теории распознавания образов [3]. Реально осуществлялась долгосрочная или среднесрочная оценка потенциальной сейсмической опасности, при которой прогноз места и времени сильного землетрясения оставался весьма неопределенным. Однако опыт многолетнего геофизического и гидрогеохимического мониторинга сейсмической опасности, анализ противоречий наблюдаемых «предвестников» и достижения в области геологии позволяют представить особенности строения, свойств и процессов в геологической среде, не имеющие аналогов в лабораторных экспериментах. Это меняет приоритеты и задачи исследований и выдвигает на первый план в рабо-

тах по прогнозу такие свойства среды, как нестабильность ее самой, так и самого очага сильного землетрясения. С учетом этого будет предложена модель сейсмического процесса, составной частью которого являются сильные коровые землетрясения.

Результаты мониторинга сейсмической опасности можно разбить на две группы. Первая группа относится к структуре среды и особенностям проявления крупномасштабных разрывов. Вторая группа результатов включает данные об изменчивости параметров среды.

Необходимо выделить блочное строение литосферы и постоянные движения блоков относительно друг друга при сохранении целостности среды. Крупномасштабные разрывы происходят на границах блоков и повторяются в одних и тех же местах с непредсказуемой регулярностью. Уже это исключает прямолинейное лабораторное моделирование сейсмического процесса. Литосфера выше границы Мохоравичича на локальном уровне переходит в трещиноватое состояние и поддерживается в этом состоянии за счет литостатического

давления и действия флюида [13]. Среда уже на локальном уровне не терпит перенапряжений, следовательно, можно говорить о парадоксе появления крупномасштабных разрывов. Кроме того, при землетрясениях снимается малая часть постоянно поддерживаемой в среде упругой энергии. Это означает, что среда находится в состоянии, близком к предельному [15].

Обнаружены непрерывные изменения различных параметров среды в сейсмоактивных и асейсмичных регионах. В условиях постоянных градиентов литостатического давления и температуры наблюдаются разномасштабные и несинхронные вариации геофизических и гидрогеохимических полей, представляемые набором гармоник с периодами от часов – суток до многих лет. Это отражает соответствующие изменения объемно-напряженного состояния (ОНС) среды. На основе данных фокальных механизмов показана значительная неоднородность полей локальных напряжений, описываемая в том числе случайными направлениями [10].

В рамках лабораторных представлений сейсмического процесса не находят объяснения целый ряд других фактов: краткосрочные признаки землетрясений в среднем «наблюдали» на большем расстоянии от эпицентральной зоны, чем среднесрочные; возмущения различных полей были нечувствительны к акту землетрясения; возмущения различных полей, контролируемые в одной локальной зоне, противоречили друг другу, то есть не соответствовали в данный момент деформации сжатия или расширения; вариации объемного деформирования, с которыми связываются подготовка сильных землетрясений, лежат в пределах одного порядка в сейсмоактивных и асейсмичных зонах, а плотность потока энергии слабых землетрясений в этих зонах различается на три порядка [10, 18].

Учет предельной энергонасыщенности среды, а также непрерывной и разномасштабной изменчивости ее параметров на первый план выдвигает вопросы физики вариаций ОНС среды вблизи предельного уровня и процессов формирования в трещи-

новатых межблочных зонах крупномасштабных структур разрушения, которые не могут быть объяснены с учетом метаморфизма и медленных тектонических движений. При этом не существует проблемы накопления предельных напряжений в больших объемах.

Непрерывные изменения параметров геологической среды в блочных и граничных структурах, отражающие изменения ОНС, свидетельствуют о накачке среды дополнительной упругой энергией. Вариации ОНС могут быть связаны с периодическим изменением объема (объема кристаллических структур) различных элементов среды. Поэтому действующий фактор должен иметь планетарный характер. Речь идет о планетарной дегазации Земли [11, 12] и, конкретно, о последствиях взаимодействия восходящих потоков легких газов (водород, гелий) с твердой фазой литосферы и экзогенными реакциями различных газов между собой в порах, трещинах и флюидных потоках.

При имплантации в образцы горных материалов водорода и гелия, в концентрациях соответствующих реальным в литосфере, деформация достигает величин 0,01–0,06 [7]. Эти величины существенно выше предельных разрушающих деформаций литосферы – 0,0001. Поэтому можно ожидать, что при определенных условиях предельные деформации будут достигнуты при весьма небольших изменениях восходящих потоков водорода и гелия (отметим, что для имплантации легких газов в кристаллические структуры или выхода из них не требуется критических величин давления или температуры). Восходящая диффузия водорода идет по каналу твердое тело–флюид–твердое тело. В твердой фазе водород диффундирует в атомарном виде. При его десорбции и последующих экзотермических реакциях с другими атомами водорода, окислами углерода и углеводородами в конечном итоге образуются молекулы воды и метана. Эти реакции наиболее интенсивно идут при температурах 400–600 °С, то есть выше границы Мохоровичича, где формируются очаги наибо-

лее сильных землетрясений. Учитывая реальный коэффициент термического расширения (10^{-5} – $5 \cdot 10^{-6}$) 1/град, предельные деформации литосферы будут достигнуты при повышении температуры всего на 10–20 °С. Для реализации таких тепловых эффектов концентрация водорода в твердой фазе должна быть около 0,1 см³/кг, что существенно ниже его реальной концентрации в литосфере.

Реакцией среды на эти процессы будут обратимые изменения объема кристаллических структур (расширение – сжатие – расширение), приводящие к вариациям ОНС во внутриблочных и граничных структурах. Из-за непостоянства в пространстве и времени восходящих потоков легких газов по глубине устанавливается динамический процесс взаимного замещения друг другом зон сжатия и расширения (рис. 1). Этим же процессом контролируются непрерывные и несинхронные вариации различных полей в блоковых структурах (деформация, наклоны, проводимость, уровень воды и др.), а также режим слабой сейсмичности из-за нарушения аккомодации между элементами среды (внутриблочные и граничные структуры) и разрушения возникающих механических зацеплений.

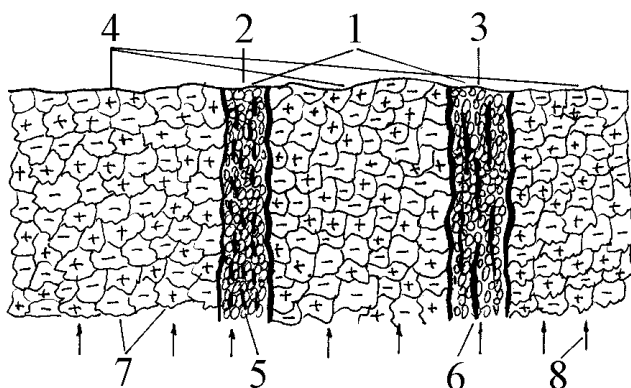


Рис. 1. Вариации ОНС среды, отражающие в граничных структурах (1) фоновый сейсмический процесс (2) и процесс подготовки очага сильного землетрясения (3), а в блоковой структуре (4) – непрерывные изменения параметров. 5 и 6 – локальные и крупномасштабные цепочки механических зацеплений в граничных структурах. 7 – зоны растяжения и сжатия. 8 – потоки легких газов

Реально существуют два режима функционирования активных границ: фоновый и формирования и распада возникающих на границах крупномасштабных структур разрушения (КСР). Априори понятно, что переход фонового режима в режим образования КСР на границах блоков связан с ограничением взаимного перемещения блоков, то есть с блокированием границ. Фоновая ситуация нарушается, когда концентрация легких газов в восходящем потоке превышает предельную, соответствующую растворимости в кристаллической решетке [7]. Как известно, горные материалы отличаются большим объемом кристаллических ячеек. Легкие газы влияют на их объем, занимая только определенные позиции, а именно дефекты упаковки в наиболее плотно упакованных структурах. Другие позиции отличаются «рыхлостью» кристаллических структур (межплоскостные расстояния больше 8 ангстрем), и диффузия легких газов через них идет с небольшой энергией активации. Из этих позиций водород и гелий быстро диффундируют за пределы структуры. Этим можно объяснить тот факт, что существует предельная концентрация растворимости легких газов, соответствующая концентрации этих газов в горных материалах (только для нормальных условий), получить значения выше которой нельзя даже при искусственной имплантации их [10].

При нарушении фонового режима динамический процесс взаимного замещения зон сжатия и расширения нарушается. Зоны расширения начинают увеличивать свои размеры за счет зон сжатия из-за избыточного потока легких газов по каналу твердое тело–флюид–твердое тело. Локальные механические зацепления на границах начинают объединяться и образовывать крупномасштабные связанные структуры. Поэтому под очагом сильного землетрясения понимается связанное состояние двух или более блоков, образующееся за счет множества механических зацеплений между элементами граничных структур и этих элементов с блоками. Связанное состояние боков означает ограничение их движения относи-

тельно друг друга, то есть блокировку границ. Будущий очаг формируется не за счет действия тектонических напряжений, а в результате физико-химических процессов в граничных и блочных структурах, обусловленных восходящими потоками легких газов. Связанная блочная структура в предельно энергонасыщенной среде весьма неустойчива. В среде постоянно меняются физико-химические и физико-механические свойства элементов и параметров контактного взаимодействия в граничных и блочных структурах за счет вариаций восходящих потоков легких газов. На среду постоянно действуют флуктуационные и периодические процессы, создавая шумовое силовое поле: приливы, метеофакторы, упругие волны местной и отдаленной сейсмичности, вариации скорости вращения Земли, весьма медленные тектонические движения блоков и др. Существующие условия в среде препятствуют образованию крупномасштабных структур разрушения. Катастрофические землетрясения с магнитудой $M > 7$ являются уникальными событиями, уникальны и условия их подготовки. Определяющим в условиях подготовки сильных землетрясений являются не процессы взаимодействия трещин различного масштаба [18], а процессы взаимодействия блоков.

Процессы дегазации на современном этапе геологического развития носят монотонный характер, на фоне которого проявляются импульсы дегазации (эндогенная активизация Земли [11, 12]) на различных пространственных масштабах, от регионального до локального (в пределах нескольких блоков или отдельных граничных структур). Тип разблокировки границ блоков, в виде крупномасштабного разрыва или естественных процессов, будет зависеть от степени пространственного нарушения фонового движения совокупности блоков. Движения каждого из блоков (по крайней мере в пределах платформ) обусловлены структурно-вещественной (физико-химической) трансформацией горных пород в зонах взаимодействия верхней мантии и нижней коры, нижней и верхней кор, а также в выше лежащих слоях. Эти про-

цессы связаны с гранитизацией и вертикальной аккрецией вещества и сопровождаются увеличением или уменьшением объема в зависимости от исходного состава [1, 14]. Хотя амплитуда деформации может достигать десяти и более процентов, скорость деформации весьма мала и составляет $5 \cdot 10^{-10}$ 1/сутки. Отмечено, что одним из следствий этих процессов является приобретение средой способности к объемной реидной деформации – тектонического течения, реализуемого блоками вдоль граничных структур. Поэтому эта деформация может оказать влияние только на уже заблокированные в предельно энергонасыщенной среде границы, создавая небольшую добавочную нагрузку. Следовательно, мы должны рассматривать реакцию упругой и жесткой верхней части блочной коры с заблокированными границами на движения в нижней оболочке, испытывающей структурно-вещественные преобразования.

Учитывая это, можно говорить о трех возможных сценариях развития сейсмотектонического процесса (рис. 2). В первом реализуется монотонный характер дегазации, все границы блоков разблокированы. Это фоновый режим, движения каждого из блоков напоминает клавишную систему (по аналогии с выражением Л. Лобковского), действие которой обусловлено особенностями реидной деформации в низах каждого из блоков. Во втором сценарии эндогенная активизация реализуется в масштабах 2 – 4 блоков (локальная активизация), и блокируется движение только этих блоков. Соседние блоки продолжают естественный режим движения. Вероятность разблокировки одной из границ крупномасштабным разрывом мала, так как нельзя исключать того, что несколько блоков могут совершать совместный режим движений, вызывая возмущения различных полей. Разблокировка границ может происходить по мере затухания эндогенной активизации. И, наконец, третий сценарий, когда происходит блокировка границ в региональном масштабе, то есть эндогенная активизация проявляется в региональном масштабе, например [2, 20]. Отражениями появления пространственно

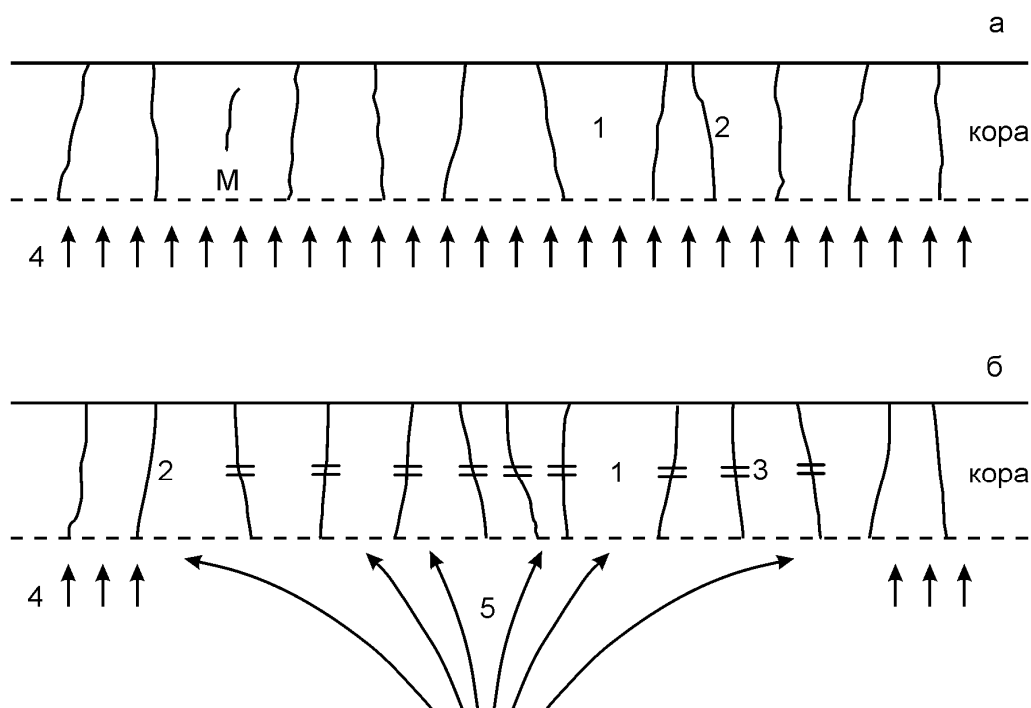


Рис. 2. Сейсмические режимы: фоновый (а) и подготовки очагов сильных землетрясений (б): 1 – блоки, 2 – границы, по которым происходят смещения блоков, 3 – заблокированные границы блоков, 4 – фоновые потоки легких газов, 5 – импульсные потоки легких газов в региональном масштабе, М – граница Мохоровичича

связанных блочных структур могут быть: кольцевая сейсмичность, относительное сейсмическое затишье, сейсмические бреши, а также многочисленные возмущения различных параметров среды на расстояниях $r \sim \exp M$ (км) от будущих эпицентров (М – магнитуда землетрясения). Поперечные размеры зон, в которых наблюдали возмущения различных параметров среды, достигают 2–3 тысяч километров [9, 12]. Но эти локальные возмущения среды не являются предвестниками, так как их положение относительно сильного землетрясения было случайным в пространстве и времени [19]. Естественно, что совокупность пространственно-временных вариаций различных полей и сейсмического режима не могли быть объяснены в рамках лабораторных представлений. Совокупность локальных возмущений параметров среды свидетельствует лишь о возбужденном состоянии литосферы. Судя по анализу этих данных [18], возбужденное состояние среды может появиться в широком интервале времен перед событиями с магнитудой $M > 5$ (от недель-месяцев до нескольких лет). Полагаем, что эта ситуация характерна как для

платформ, так и зон субдукции (глубокофокусные землетрясения не рассматриваются). Подтверждением последнего могут служить, например, данные по направлениям разрывов, лежащих почти вкрест, так называемому, направлению движения океанической плиты [17].

Возможен ли прогноз места и времени разблокировки конкретной граничной структуры? Приведем результаты моделирования разрушения связанной структуры, представляемой совокупностью механических зацеплений [4, 5]. Фактически связанные структуры – это цепочки механических зацеплений. В реальных нестационарных условиях отдельные механические зацепления испытывают связанные колебания (коллективные моды), то есть колебания каждого из них в цепочке зависят от движения соседних. При определенных внутренних условиях и внешних полях эти колебания могут перейти в специфический аperiодический режим с последующим распадом локальных или крупномасштабных цепочек, приводящих к поддержанию или восстановлению фонового режима.

Колебательный режим совокупности механических зацеплений (далее элементов) в цепочке (системе цепочек) в открытой и нелинейной среде рассматривался в рамках модели Ферми–Паста–Улама (ФПУ) [4, 5], описывающей динамику нелинейных взаимодействий осцилляторов-элементов. В отличие от Ферми с соавторами рассматривались неоднородные цепочки с различными массами и меняющимися во времени параметрами упругих линейных и нелинейных взаимодействий между элементами. Такое представление граничных структур позволяет учитывать различные условия их динамики: тектонические и фоновые силовые воздействия, включая квазистационарное нагружение, шумовые, периодические и импульсные воздействия различной природы, изменения параметров контактного взаимодействия отдельностей в граничной структуре.

В принципе, даже одну цепочку можно рассматривать в качестве основной части структуры разрушения от фонового класса до предельного. Масштабы цепочек определяют энергию распада и, следовательно, режимы функционирования границ. Критерием устойчивости выбрано время жизни цепочек, заканчивающееся их распадом. Под распадом цепочек понимается переход движения ее отдельных элементов из квазипериодического в аperiodическое, когда амплитуда смещения элементов неограниченно возрастает.

Динамика цепочек описывается системой связанных нелинейных дифференциальных уравнений

$$m_{ij} \cdot d^2 x_{ij} / dt^2 = -k_{i+1, j} (x_{i+1, j} - x_{ij}) + k_{ij} (x_{ij} - x_{i-1, j}) + \alpha_{i+1, j} (x_{i+1, j} - x_{ij})^2 - \alpha_{ij} (x_{ij} - x_{i-1, j})^2 - v_{ij} dx_{ij} / dt + \dots$$

которая решается численно. Здесь i – число элементов в цепочке, j – число цепочек в граничной структуре, m_{ij} – массы различных элементов, x_{ij} – смещения элементов, k_{ij} – коэффициенты линейной упругости,

α_{ij} – коэффициенты нелинейной упругости, v_{ij} – коэффициенты диссипации, многоточие означает внешние силы. К этой системе добавляются два уравнения движения блоков, образующих «разлом» и создающих нагружение (деформацию) цепочек и уравнения движения крайних элементов, примыкающих к этим блокам.

Самым существенным результатом моделирования является обнаружение долгоживущих и короткоживущих состояний цепочек (связанных состояний) и резких переходов между ними как в прямом, так и обратном направлениях, что обусловлено действием внешних и внутренних полей различной природы и физико-химическими процессами в граничных структурах. Наиболее сильное влияние на время жизни связанных состояний оказывает уровень фоновых силовых полей (периодических и флуктуационных) и скорость деформирования, причем моделирование показало наличие критических значений этих факторов, при достижении которых долгоживущие состояния скачком переходят в короткоживущие, то есть происходит быстрый распад связанного состояния. Следует подчеркнуть, что время жизни связанных состояний уменьшается с ростом скорости деформирования.

Необходимо учитывать, что в реальных условиях комбинаций различных полей, действующих на связанные структуры в региональной зоне возбуждения, очень много и они могут иметь особенности в различных связанных структурах. Каждая комбинация вносит свои коррективы в долговечность той или иной структуры, подчеркивая ее крайнюю неустойчивость в непрерывно изменяющихся условиях.

В связи с изложенным очевидна неопределенность места или конкретной границы разблокировки, также как и времени этого, в пространственно связанной блочной структуре.

Сейчас нельзя исключать того, что сделать краткосрочный прогноз разблокировки разрушением конкретной границы будет нельзя. Более же апробированы методы

краткосрочного прогноза времени сильных землетрясений в масштабах региона с использованием радиоволнового трассового мониторинга волновода Земля – ионосфера [6]. Этим же методом было показано, что литосферная зона, возмущающая параметры волновода Земля – ионосфера, изменяет свое положение вдоль радиотрассы не менее чем на 500 – 600 км в течение периода краткосрочной сейсмической опасности (менее 25–30 суток), что подтверждает неопределенность возможного места землетрясения во временной период краткосрочной сейсмической опасности

Перспективны для целей обнаружения процесса эндогенной активизации в региональном масштабе методы мониторинга времен пробега продольных и поперечных волн, контроля концентраций водорода и гелия, мониторинга динамики суточных ходов геоакустических сигналов и некоторые другие. Причем время для анализа ситуации и принятия решений о прогнозе весьма ограничено. Неопределенность места разрушения пространственно связанной блочной структуры делает целесообразным комплексирование сейсмологических, радиоволновых и ряда других средств мониторинга для краткосрочного регионального прогноза интервала времени сильных землетрясений.

Эти проблемы прогноза должны усилить интерес к исследованиям по предотвращению сильных землетрясений. В рамках природы сейсмического процесса этого можно достичь путем искусственного вибровоздействия на пространственно связанную блочную структуру, влияя на параметры восходящих потоков легких газов [8], ускоряя тем самым естественный процесс разблокировки границ (или не допуская появления крупномасштабных связанных структур), уменьшая одновременно пространственный масштаб связанной структуры и переводя развитие процесса по второму сценарию. Основанием для такой постановки вопроса являются также данные по изменению сейсмического режима в локальной зоне при

сбросе воды гидроэлектростанциями [16]. Распределенная по элементарным связям в локальной зоне энергия была порядка тепловой, что обеспечивало быструю релаксацию внутренних напряжений в граничных и блоковых структурах. Для быстрого влияния на сейсмический режим в региональном масштабе необходимо воздействие, как минимум, на локальную блочную структуру, включающую несколько блоков. Здесь энергия, распределенная на элементарную межатомную связь, может быть порядка $(10^{-5}-10^{-2}) kT$, где k – постоянная Больцмана, T – температура. Оценки показывают, что вводимая в среду плотность энергии должна быть $(10^{-3}-1)$ Дж/м³, и воздействие должно осуществляться в течение недель или месяцев. В тоже время методология воздействий и мониторинга реакции среды должна учитывать нелинейные свойства среды [5], ритмичность геофизических полей и процессов дегазации, а также пространственный масштаб зоны возмущения.

Литература

1. Вертикальная аккреция земной коры. Факторы и механизмы / Под ред. М.Г. Леонова. М.: Наука, 2002. 461 с.
2. Войтов Г.И. К проблемам водородного дыхания Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ: Сб. статей. М.: ГЕОС, 2002. С. 24–30.
3. Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ранцман Е.Я., Соловьев А.А. Проверка результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений с 1972 по 2000 год // Вычислительная сейсмология, 2001. Вып. 32. С. 48–57.
4. Гусев Г.А. Неоднородная цепочка Ферми-Паста-Улама для описания динамики очага землетрясения // Доклады Академии наук, 2001. Т. 376. № 5. С. 675–678.
5. Гусев Г.А., Гуфельд И.Л. Прогноз землетрясений и построение нелинейной теории сейсмического процесса // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. Материалы 2 международного симпозиума. Москва-Бишкек, 2003. С. 222–232.

6. Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф. Краткосрочный прогноз времени сильных коровых землетрясений // Доклады Академии наук, 1992. Т. 323. № 6. С. 1064–1067.
7. Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Матвеева М.И. Метастабильность литосферы как проявление восходящей диффузии легких газов // Доклады Академии наук, 1998. Т. 365. № 5. С. 677–680.
8. Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Собисевич А.Л. Управление сейсмическим процессом: реальность и проблемы // Геофизика XXI столетия: 2003 – 2004 годы. Тверь: ГЕРС, 2005. С. 97–104.
9. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ РАН, 1991. 218 с.
10. Динамические процессы в геофизической среде / Под ред. А.В. Николаева. М.: Наука, 1994. 225 с.
11. Летников Ф.А., Дорогокупец П.И. К вопросу о роли суперглубинных флюидных систем земного ядра в эндогенных геологических процессах // Доклады Академии наук, 2001. Т. 378. № 4. С. 535–537.
12. Маракушев А.А. Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, 1999. 254 с.
13. Николаевский В.Н. Катакластическое разрушение пород земной коры и анамалии геофизических полей // Физика Земли, 1996. № 4. С. 41–50.
14. Петрология и флюидный режим континентальной литосферы / Ф.А. Летников, Г.Д. Феоктистов, Н.А. Вилор и др. Новосибирск: Наука, 1988. 187 с.
15. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
16. Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1987. 119 с.
17. Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 236 с.
18. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
19. Трапезников Ю.А. Связь сейсмических процессов с накоплением упругой энергии в земной коре // Проявления геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. С. 139–150.
20. Фирстов П.П., Широков В.А. Динамика молекулярного водорода и ее связь с геодинамическими процессами на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне по данным наблюдений в 1999-2003 гг. // Геохимия, 2005. № 11. С. 1151–1160.