

УДК 550.34+551.21+551.14

ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ И ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

© 2015 В.Л. Натяганов, А.М. Нечаев

*Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991; logata@yandex.ru*

Рассматриваются альтернативные механизмы землетрясений и извержений вулканов, в которых ведущую роль играют подземные компактные области, где аккумулированы глубинные перегретые флюиды. Перераспределение флюидного давления между этими областями за счет миграции флюидов по трещинам и разломам может провоцировать как сейсмическую, так и вулканическую активность данного региона, а также обуславливать различные варианты их взаимозависимости.

Ключевые слова: землетрясение, извержение вулкана, глубинные флюиды, облачные сейсмотектонические индикаторы.

ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ И ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИМЕРЫ

О фактах триггерного воздействия сильных землетрясений на активизацию вулканизма в Чили стало известно после кругосветного путешествия Чарльза Дарвина на корабле «Бигль» и публикаций его дневников (Галиев, 2011). Активизация вулканизма после сильных землетрясений также фиксировалась в историческое время в Японии, Индонезии и России (Камчатка) (Новейший ..., 2005). Триггерный характер воздействия сильных землетрясений на активизацию вулканизма отмечается в работе (Linde, Sacks, 1998), а в сборнике работ (Федотов, 2006) проанализирован уникальный случай мощных извержений в кальдере Академии Наук Карымского вулканического центра на Камчатке спустя более 20 тысяч лет покоя в начале января 1996 г. сразу после роя близких землетрясений с максимальной магнитудой $M=6.9$.

Дискуссионным остается вопрос: какое из землетрясений сыграло роль триггера? И почему в ряде других сходных случаев (Галиев 2011) триггерного воздействия на ближайшие вулканы не наблюдалось? Еще один важный вопрос, который до работы (Дода и др., 2013) с описанием схемы краткосрочного прогноза землетрясений Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) в научной литературе не ставился: существуют ли явные

примеры, когда прогнозируемая различными методами сейсмическая активность заменялась вулканической? Здесь подразумеваются сильные землетрясения, а не рой относительно слабых сейсмособытий наподобие известного вулканического дрожания или «дребезга». На Камчатке были зафиксированы случаи замены (Дода и др., 2013) прогнозируемых сильных землетрясений на вулканическую активность: вулкана Шивелуч 19–20.12.2008 г. и резкая активизация четырех вулканов в течение одной недели января 2010 г. Позже были отмечены аналогичные случаи замены и в других сейсмоопасных регионах планеты (Индонезия, Исландия, Италия, Чили, Япония) с действующими вулканами (Doda et al., 2015). Из недавних случаев подобной замены следует отметить внезапные пробуждения вулкана Плоский Толбачик 27–28.11.2012 г. после 36 лет «спячки» и вулкана Онтаке 28.09.2014 г. в Японии с человеческими жертвами и неожиданно возникшим над сушей тайфуном Фанфон, а также давно потухшего (как полагало большинство вулканологов) вулкана Пуйеуэ 06.06.2011 г. в Чили, из-за мощного извержения которого и выброса пепла в южном полушарии были закрыты многие аэропорты (Doda et al., 2015).

Эти и подобные эмпирические факты свидетельствуют, что землетрясения и вулканические извержения имеют некоторые общие «генетические корни». Основным фактором могут служить глубокие компактные области, где аккумуля-

рованы перегретые флюиды, находящиеся в надкритическом состоянии. Действительно, большинство действующих вулканов и очагов землетрясений «тяготеют» к границам литосферных плит, в особенности в зонах субдукции, где океаническая плита, богатая обводненными породами, пододвигается под континентальную плиту, питая глубокие уровни земной коры самым распространенным флюидом – водой. Под землей в полостях или в пористых породах могут аккумулироваться водяной пар, водород, метан, углекислый, сернистый и другие газы. Данные сверхглубокого бурения (Кольская ..., 1984) и другие факты подтверждают это.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ОБЛАЧНЫЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ

В работах (Дода и др., 2013; Doda et al., 2011) подробно изложена эмпирическая схема Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) по краткосрочному прогнозу наиболее вероятных дат, мест и магнитуд будущих землетрясений. Триггером землетрясений от геоэффективных событий на Солнце по схеме НЦ ОМЗ являются геомагнитные возмущения, которые позволяют рассчитать по специальному алгоритму так называемые сейсмомагнитные меридианы (СММ); а цепочки возможных землетрясений наиболее вероятны в местах пересечения СММ с границами литосферных плит (предварительный прогноз возможных местоположений эпицентров). Топологический вид двух семейств СММ представлен в работе (Дода и др., 2013), а с их зонами действий в $\pm 3^\circ$ – в работе (Doda et al., 2015).

Важным прогностическим признаком в схеме НЦ ОМЗ служат облачные сейсмотектонические индикаторы (ОСТИ), которые дают не только дополнительную локализацию в зонах действия СММ мест будущих землетрясений, но и позволяют оценить с точностью до ± 0.2 потенциальные значения магнитуд M по простой формуле:

$$L/L_0 = \exp M \Leftrightarrow M = \ln L/L_0, (1)$$

где L – максимальный характерный линейный размер ОСТИ, $L_0 = 1 \text{ км}$.

Основная проблема по краткосрочному прогнозу землетрясений в сейсмоопасных и одновременно вулканоактивных зонах связана с очевидными трудностями регистрации ОСТИ на фоне сильной облачности, известных орографических эффектов от высоких гор или струй дымящихся вулканов. Например, космические снимки характерных ОСТИ для

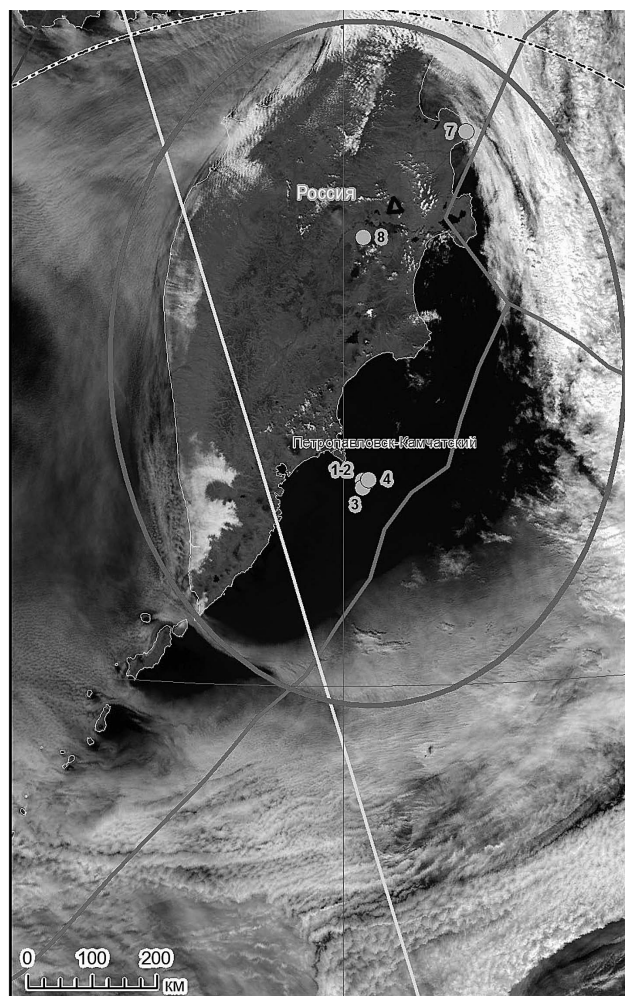


Рис. 1. Треугольное «окно» в облачности над Камчаткой 21.06.2012 (Aqua/Modis). Белая линия – сейсмомагнитный меридиан, серый эллипс – облачный сейсмоиндикатор, серые ломаные линии – литосферные разломы, штрих-пунктир – потенциальная зона землетрясения. Цифрами обозначены очаги землетрясений в окрестностях Камчатки с 18 по 26 июня 2012 г. Черный треугольник рядом с очагом № 8 – вулкан Шивелуч.

Камчатки обычно размыты или быстро меняют свой тип, что затрудняет их идентификацию. Однако существуют редкие исключения из этого почти общего правила (рис. 1), когда под ОСТИ типа треугольного «провала» ясного неба случились спрогнозированные заранее по схеме НЦ ОМЗ землетрясения с $\text{max } M=6.1$ и произошла резкая активизация вулкана Шивелуч 25.06.2012 г.

Разные типы ОСТИ свидетельствуют о восходящем движении глубинных флюидов по трещинам и разломам с их возможным выходом в атмосферу, что нарушает физико-химическое и энергетическое равновесие в атмосфере на уровне облаков и приводит к локальному усилению или подавлению конденсации. Многочисленные свидетельства эмиссии различных газов до и

во время землетрясений (Gold, Soter, 1985) в ряде случаев оказывались более достоверными предвестниками главного удара, чем трудно фиксируемое достижение предельного деформационно-напряженного состояния коры.

Что касается вулканов, то мало у кого возникает сомнение в том, что глубинная газовая субстанция также играет значительную роль в подготовке и развитии вулканических извержений. Однако имеет место недооценка этого влияния на процессы подготовки землетрясений и извержений вулканов. Оставляя за рамками данной работы учет глобальных факторов (типа нестабильности вращения Земли) и причины статистической приуроченности сейсмической и вулканической активности к критическим параллелям планеты (Doda et al, 2015), а также анализ целого комплекса разнообразных и часто взаимосвязанных физико-химических (Гуфельд, 2007; Киссин, 2009), вибрационно-волновых (Галиев, 2011; Нигматулин, 2014) и электротепловых (Натяганов, 2007, 2010) процессов на микро- и мезоуровнях, рассмотрим на макроуровне два взаимодействующих механизма активизации сейсмичности и (или) вулканизма.

МЕХАНИЗМЫ АКТИВИЗАЦИИ СЕЙСМИЧНОСТИ И ВУЛКАНИЗМА

Далее будем исходить из представлений о роли глубинных флюидов, сформулированных в (Киссин, 2009), и воспользуемся понятием субгоризонтального флюидонасыщенного тела (СГФТ), которое определим как некий замкнутый объем V , содержащий газообразный флюид (СГФТ может иметь внутри себя и жидкую фазу, но для простоты будем считать последнюю отсутствующей). Вертикальный размер СГФТ (средняя толщина h) намного меньше его поперечных размеров: $V \sim hS$, где S – сечение СГФТ. Существенно, что породы, заполняющие СГФТ должны быть проницаемыми (пористыми), для того чтобы давление флюида устанавливалось одинаковым по объему. Как известно, состояние флюида, находящегося в надкритическом состоянии, удовлетворяет с хорошей точностью уравнению идеального газа (Зубарев и др., 1989). Следовательно, давление флюида можно оценивать по формуле:

$$p = \frac{M(t)}{V} RT, \quad (2)$$

где $M(t)$ – масса флюида, которая может меняться со временем, R – универсальная газовая постоянная флюида, T – температура.

Пусть СГФТ размещается на глубине H , где присутствует непроницаемый для флюида слой, создающий ряд ловушек или покрывок.

Образование подобных СГФТ может происходить в соответствии с механизмом подъема субвертикальных флюидных областей, описанном в (Gold, Soter, 1985). Избыточное давление флюида расширяет и удлиняет микротрещины, а разность литостатических давлений между верхом флюидной области и ее низом продвигает всю флюидную область вверх: в сущности, она «всплывает» (Нигматулин, 2014) как некий снаряд до тех пор, пока не достигнет преграды: непроницаемого слоя на глубине H либо поверхности земли. В принципе, давление внутри стабильной СГФТ должно стремиться к литостатическому ρgH , где ρ – средняя плотность коры. Избыточное или недостаточное давление флюида может компенсироваться изменением объема СГФТ за счет микроразрушений. Таким образом, в соответствии с (Gold, Soter, 1985) мы полагаем, что формирование СГФТ происходит за счет аккумуляции флюида при его подъеме из областей верхней мантии или при химических преобразованиях породы (например, дегидратации).

Предположим, что на разных глубинах существуют СГФТ, где аккумулируется флюид благодаря существованию непроницаемых для него слоев (рис. 2). В какой-то момент вокруг этих СГФТ и внутри них образуется система трещин вследствие разных, в том числе и тектонических причин. Трещины могут «замкнуть» СГФТ между собой, а тогда в системе трещин и СГФТ начинается перераспределение флюида: флюид с больших глубин, где его давление выше, идет наверх, в том числе и в атмосферу. Давление во

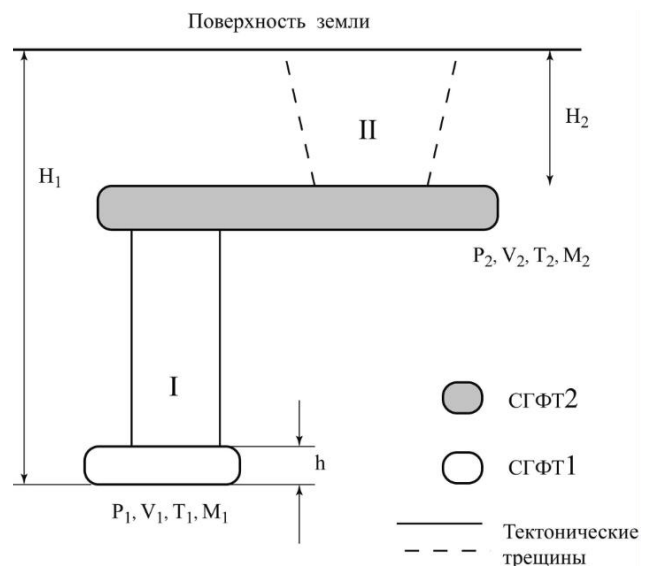


Рис. 2. Условное изображение двух СГФТ на разных глубинах. Тектонические трещины соединяют («замыкают») их между собой и (или) с поверхностью Земли. H , P , V , M , T – уровни залегания, давление, объем, масса и температура флюида в соответствующих СГФТ.

флюидных зонах резко меняется: в одних (мелких) оно увеличивается, в других (глубоких) обычно падает, что может привести к коллапсу соответствующих геологических структур и сейсмическим событиям. Особенность данного механизма землетрясения – его физическая простота и ясность. Он позволяет дать простую трактовку энергии главного удара (обрушение кровли наиболее глубокой из флюидных зон) и объяснить появление как форшоковых, так и афтершоковых событий.

Действительно, сброс давления в СГФТ произойдет, если некая трещина, совокупность трещин или разлом соединит эту СГФТ с поверхностью земли или с другой СГФТ, находящейся на существенно меньшей глубине и при соответственно меньшем давлении. Подобное «короткое замыкание» может иметь место в зонах тектонического напряжения – зонах субдукции, серпентинизации, рифтогенеза – везде, где кора подвергается механическому сжатию или растяжению.

Первоначально давление в каждой СГФТ равно литостатическому, при этом оно должно удовлетворять уравнению состояния (2). При возникновении трещины, соединяющей СГФТ, происходит перераспределение давления в соответствии с параметрами каждой СГФТ и гидродинамическими условиями всей системы «СГФТ-трещина». Если уменьшение давления в СГФТ1 достигнет предела прочности, то произойдет обрушение блока I (рис. 2). Если увеличение давления в СГФТ2 достигнет своего предела прочности, то произойдет взброс блока II. Если вторичная система трещин II (рис. 2) приведет к контакту СГФТ2 с атмосферой, то после взброса может произойти обратное падение блока II, так как давление в СГФТ2 станет равным атмосферному. Описанное выше обрушение блока I можно отнести к моменту главного удара. Максимальная энергия этого удара будет, очевидно, равна $\rho g(H_2 - H_1)S_f h$, где S_f – сечение блока I, h – толщина СГФТ1. Например, обрушение блока кубической формы со стороной в 1 км на глубину $h = 1$ м может сопровождаться выделением энергии в 10^{13} Дж, что соответствует магнитуде 5.5.

Вулканическое извержение также может явиться следствием взаимодействия магматической системы с СГФТ (рис. 3). Суть этого механизма – в неустойчивости столба гидростатической жидкости (магмы), контактирующего с объемом газа (флюидное тело). Первоначально этот механизм был предложен для объяснения гейзерного извержения (Belousov et al., 2013; Nechaev, 2012), затем расширен на вулканические извержения (Нечаев, 2013). Извержение магмы происходит, если объем перегретого

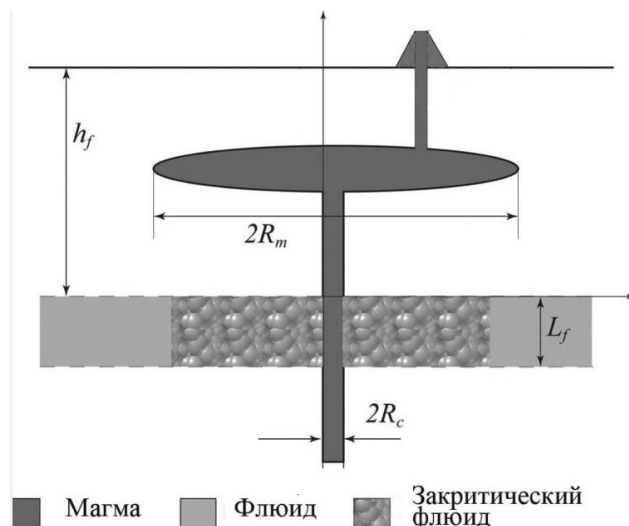


Рис. 3. Схема магматической системы с вулканом, очагом и магматическим каналом, пересекающим СГФТ. h_f, L_f – глубина залегания и толщина флюидного тела; R_c, R_m – радиусы магматического канала и очага.

флюида превысит критический уровень V^* , определяющийся по формуле.

$$V^* = \gamma h_f \pi R_c^2, \quad (3)$$

где h_f – глубина залегания флюидного тела, R_c – радиус магматического канала в месте контакта с флюидом, γ – коэффициент адиабаты для флюида. Объем флюида – это та часть флюидного тела, которая оказалась прогретой магматическим очагом до надкритической температуры (для воды – выше 350°C). В соответствии с рис. 3 этот объем приблизительно равен $\pi R_m^2 L_f$.

Если объединить оба этих механизма, можно представить картину взаимодействия сейсмических и вулканических событий. Флюидные области посредством тектонических трещин, возникающих в активных литосферных зонах, могут получать контакт друг с другом, с атмосферой, либо с ближайшей магматической системой (рис. 4). При этом возможны различные варианты продолжения. В том числе возможна подмена землетрясения на извержение, когда СГФТ не находит выхода в атмосферу (либо этот выход затруднен вследствие узости или протяженности трещин) и переносит свое избыточное давление на магматическую систему.

ВЫВОДЫ

1. Эмпирические факты позволяют утверждать, что землетрясения и вулканические извержения могут иметь некоторые общие «генетические корни».

2. Основным объединяющим фактором могут служить подземные компактные зоны, где

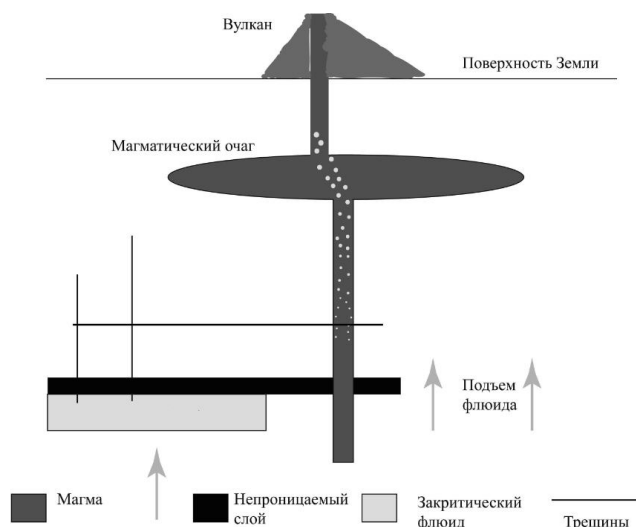


Рис. 4. Схема взаимодействия магматической системы и СГФТ с возможной заменой землетрясения на вулканическое извержение.

аккумулированы глубинные флюиды, находящиеся в надкритическом состоянии.

3. Активизация этих подземных зон может происходить при их пересечении тектоническими трещинами и разломами, возникающими при предельных напряжениях в соответствующих областях литосферы.

4. Образование системы трещин обуславливает перераспределение флюидов между зонами их аккумуляции, а также выход в атмосферу с образованием соответствующих облачных структур. Это должно сопровождаться изменением давления флюида на разных уровнях, что может приводить к механическому разрушению этих зон и соответствующим сейсмическим ударам.

5. Если область аккумуляции флюида получает контакт с магматической системой (за счет тех же тектонических трещин), не имеет выхода в атмосферу, но имеет избыточное давление и закритический объем, то может произойти вулканическое извержение, которое будет сопровождаться землетрясением или заменит его, забрав на себя всю энергетику.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (в соответствии с требованием государственного контракта № 14.577.21.0109, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0109).

Список литературы

Галиев Ш.У. Геофизические сообщения Чарльза Дарвина как модели теории катастрофических волн. М.: Центр современного образования, 2011. 656 с.

Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.

Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Степанов И.В. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений // ДАН. 2013. Т. 453. № 5. С. 551-557.

Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М. Термофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях. М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.

Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. М.: Наука, 2009. 328 с.

Кольская сверхглубокая / Под ред. Е.А. Козловского М.: Недра, 1984. 492 с.

Натяганов В.Л. Ломоносов и загадки природного электричества. Часть 2. Электротепловой пробой в литосфере как триггер землетрясений // Вестник Московского ун-та. Сер. 1. Математика. Механика. 2007. № 4. С. 40-46.

Натяганов В.Л. Ломоносов и загадки природного электричества. Часть 3. Электромагнитная природа световых предвестников землетрясений // Вестник Московского ун-та. Сер. 1. Математика. Механика. 2010. № 3. С. 24-31.

Нечаев А.М. О механизме извержения вулкана // Физическая экология. 2013. № 19. С. 551-568

Нигматулин Р.И. Механика сплошной среды. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 640 с.

Новейший и современный вулканизм на территории России / Под ред. Н.П. Лаврова М.: Наука, 2005. 604 с.

Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.

Belousov A., Belousova M., Nechayev A. Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for the geyser mechanism // *Geology*. 2013. V. 41. № 4. P. 387-390.

Doda L.N., Dushin V.R., Natyaganov V.L. et al. Earthquakes forecasts following Space and ground-based monitoring // *Acta Astronautica*. 2011. V. 69. № 1-2. P. 18-23.

Doda L.N., Malashin A.A., Natyaganov V.L., Stepanov I.V. Seismotectonics and Ground-Space Monitoring of Signs of Natural Disasters in the Earth // *Acta Astronautica*. 2015. V. 109. P. 254-263.

Gold T., Soter S. Fluid Ascent through the Solid Lithosphere and its Relation to Earthquakes // *PAGEOPH*. 1984/85. V.122. Iss. 2-4. P. 492-522

Linde A.T., Sacks I.S. Triggering of volcanic eruption // *Nature*. 1998. V. 395. №6705, P. 888-890.

Nechayev A. About the Mechanism of Geyser Eruption // URL <http://arxiv.org/> 2012, Arxiv:1204.1560

ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ
**POSSIBLE MECHANISMS OF INTERDEPENDENCE BETWEEN
SEISMIC AND VOLCANIC ACTIVITY**

V.L. Natyaganov, A.M. Nechayev

Lomonosov Moscow State University

The article describes the alternative mechanisms of earthquakes and volcanic eruptions in which the leading role is played by the deep compact fluid areas. Redistribution of fluid pressure between these areas due to the migration of fluids along fractures and faults can provoke seismic and volcanic activity in the region, as well as determine the different sorts of their interdependence.

Keywords: earthquake, volcanic eruption, deep fluids, cloud seismotectonic indicators.