

О МЕХАНИЗМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВУЛКАНИЗМА В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

© 2022 Ю.Л. Ребецкий¹, Ю.П. Стефанов^{2,3}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; reb@ifz.ru

²Институт нефтяной геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия; yu_st@mail.ru

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Поступила в редакцию 10.10.2022 г.; после доработки 01.12.2022 г.; принята к публикации 26.12.2022 г.

Обсуждаются вопросы взаимосвязи сильных землетрясений и мощного вулканизма в зонах субдукции. Показано, что аномально сильные землетрясения или группу сильных землетрясений и мощные вулканические события или вулканическую активизацию больших территорий можно рассматривать как взаимосвязную геодинамическую пару. При высоком уровне горизонтального сжатия магмопроводящие разломы зажаты и вулканизм в верхней части коры затруднен. Мега-землетрясения или серия сильных землетрясений приводят снижению уровня горизонтального сжатия в коре островной дуги (континента активной окраины), что создает благоприятные условия для возобновления вулканической деятельности. Для главных разломов, расположенных вдоль простирающихся зон субдукции, движение магмы вверх в процессе вулканических извержений или внутрикорового магматизма приводит к повышению напряжений горизонтального сжатия в окружающих породах до уровня давления поднимающейся магмы. В результате этого в коре восстанавливается напряженное состояние горизонтального сжатия и, таким образом, цикл замыкается. Вновь возникает состояние, при котором эффективным механизмом снижения напряжений являются землетрясения.

Ключевые слова: напряжения, вулканизм, землетрясения, сжатие, растяжение, разломы, магма.

ВВЕДЕНИЕ

Выяснение механизма взаимосвязи сейсмичности и вулканизма является фундаментальной проблемой геодинамики, которая при всей ее актуальности и практической значимости не имеет должного развития в современных исследованиях. В научной литературе и в докладах на конференциях можно встретить утверждения, как о наличии, так и об отсутствии взаимодействия между этими явлениями (Абдурахманов, Федорченко, 1976; Гусев, 2014; Хаин, Халилов, 2008). При этом не выявляется прямой физико-механической связи между сейсмичностью и современным вулканизмом. В частности, для Курило-Камчатской складчатой системы говорят лишь в том смысле, что эти явления проявляются в одной и той же структурной зоне. При более детальном рассмотрении между ними устанавливается обратная зависимость (Горячев,

1966). Здесь надо понимать, что речь идет о тектонических землетрясениях, а не о вулканогенных, происходящих в непосредственной зоне магматического очага и его магмопроводящих каналов.

Наиболее ярко эта проблема встает для коры активных континентальных окраин, где согласно существующим взглядам геодинамики формирование вулканов и землетрясений связано с пододвиганием океанической литосферы под континентальную или субконтинентальную (Теркот, Шуберт, 1985). Для этих участков коры имеет место субпараллельное расположение линеаментов простирающихся зон повышенной сейсмичности и зон вулканизма (Ребецкий, 2007; Федоров, 2006). При этом силы, обеспечивающие внедрение океанической литосферы в мантию, с одной стороны, создают те тектонические напряжения, которые ответственны за возникающие землетрясения, а с другой, формируют глубинные неоднородности, обеспечивающие магмой возможность

вулканической деятельности в континентальной литосфере или островной дуге (Жарков, 2013).

Вполне возможно, что в других геодинамических обстановках (континентальные орогены, континентальные рифты, зоны океанического спрединга литосферных плит) в полном объеме могут быть не применимы выводы о взаимосвязи вулканизма и сейсмичности, сделанные для зон субдукции. Но установление механизма взаимодействия для столь предельно проявленной на планете геодинамической обстановки поможет в дальнейшем развитию взглядов на взаимосвязь вулканизма и сейсмичности также и в других типах геологических объектов, например, в коре внутриконтинентальных орогенов.

В настоящей работе исследуется механизм взаимодействия землетрясений и вулканизма в коре активных континентальных окраин. При этом наши исследования базируются на тектонофизических данных о напряжениях субдукционных зон и тектонофизическом анализе изменения коровых напряжений в зонах активизации вулканов в моменты продвижения магмы по субвертикальным каналам.

КРАТКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ И ДАННЫХ О ВЗАИМОСВЯЗИ ВУЛКАНИЗМА И СЕЙСМИЧНОСТИ

Периодически на научных конференциях можно услышать доклады, в которых обсужда-

ются вопросы соотношения временных периодов вулканической и сейсмической активности и их взаимосвязи с различными глобальными явлениями — солнечной активностью, изменением скорости вращения планеты и другими космическими явлениями. При этом крайне редки исследования генезиса связей вулканической и сейсмической активизации или сильнейших землетрясений и извержений. Здесь, пожалуй, следует выделить работы камчатских ученых и их соавторов (Акманова, 2008; Викулин и др., 2007а; Мелекесцев и др., 2005), в которых для землетрясений и вулканов северо-западного фланга Тихоокеанской плиты была выявлена однонаправленная, близкая по порядку величин скорость их миграция (рис. 1).

В серии работах А.В. Викулина с соавторами (Акманова и др., 2009; Викулин, 2011; Викулин и др., 2007а, 2007б, 2007в; Викулин и др., 2009а, 2009б, 2009в) обосновывается существование взаимосвязи между сейсмическим и вулканическим процессами. Показано, что она имеет не локальный, а региональный характер, т.е. взаимосвязаны не конкретные землетрясения и извержения вулканов, а их совокупности, рассматриваемые в пределах региона. Отмечались случаи активизации вулканизма после возникновения группы сильных землетрясений. В заливе Якутат, расположенном на Аляске, в конце IX в. ((6–10).09.1899) произошла серия из четырех сильнейших землетрясений с $M = 8.3; 7.8; 8.6; 8.3$ (McCann et al., 1980). После

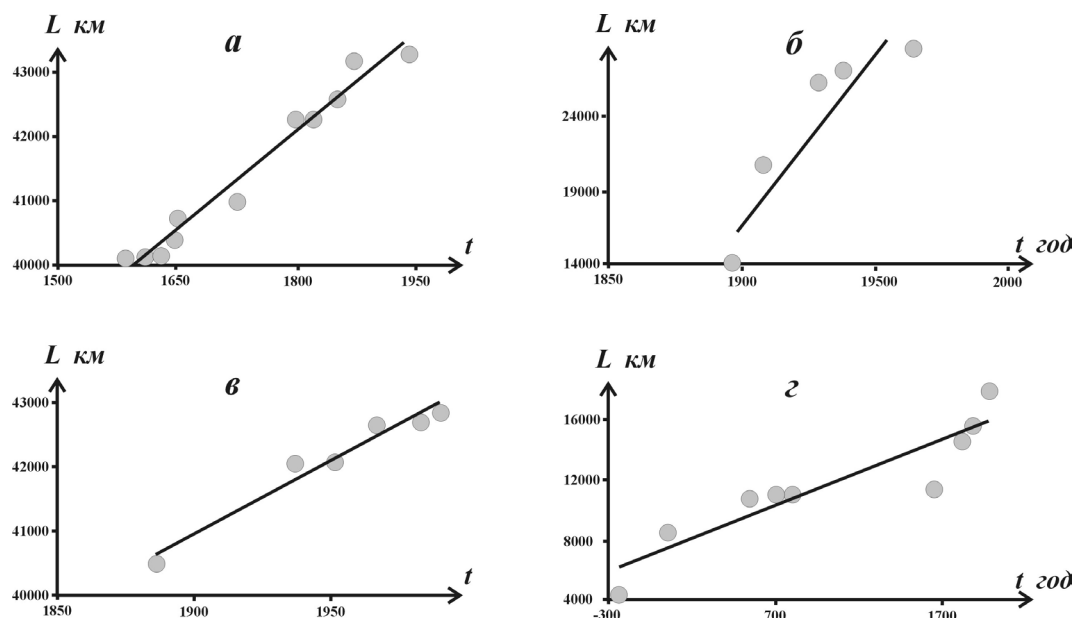


Рис. 1. Примеры полученных миграционных цепочек очагов сильнейших землетрясений с $M \geq 7.5$ (а), $M \geq 8.5$ (б) и вулканических извержений с $W \geq 4$ (в), $W \geq 6$ (г) вдоль окраины Тихого океана (Викулин и др., 2007а). L — расстояние вдоль окраины Тихого океана, в км.

Fig. 1. Examples of migration chains of foci of the strongest earthquakes with $M \geq 7.5$ (а), $M \geq 8.5$ (б) and volcanic eruptions with $W \geq 4$ (в), $W \geq 6$ (г) along the margin of the Pacific Ocean (Vikulin et al., 2007a). L is the distance along the Pacific Ocean margin, in km.

чего с задержкой в более 10 лет (1912 г.) произошло мощное извержение вулкана Новарупта (Катмай) на Аляске (Hildret, 1983).

В начале XX в. ((25–27).06.1904) на юге Камчатки произошло три сильнейших землетрясения с $M = 8.0$; 8.1 ; 7.9 (Гусев, Шумилина, 2004), после чего с задержкой в три года (1907 г.) произошло извержение вулкана Ксудач (Мелекесцев, Сулержицкий, 1987). В 1737 г. имело место три сильнейших землетрясения с $M_w = 9.2$; 7.8 ; 8.0 (Гусев, Шумилина, 2004), очаги которых располагались вдоль тихоокеанского побережья Северных Курильских островов на протяженности около 1000 км. Вслед за ними в период до 1742 г. на Камчатке (Викулин и др., 2007; Мелекесцев и др., 2005) начались извержения вдоль Восточной вулканической зоны и в Срединном хребте на протяжении ≈ 670 км (извергались или находились в стадии повышенной активности, как минимум, 15 вулканов).

Аналогичная последовательность сильного землетрясения и последующей (с задержкой по времени в несколько лет) активизацией вулканизма наблюдалась для самых сильных в XX в. извержений вулканов Безымянного на Камчатке в 1955 г. и Эль-Чичон в мексиканской части Кордильер в 1982 г.

Сопка Безымянная длительное время считалась потухшим вулканом (рис. 2а). О ее пробуждении возвестили подземные толчки, а извержение началось рано утром 22 октября 1955 г. (Белоусов, Белоусова, 1998). За несколько дней высота вулканических выбросов достигла 8 км. Гигантский взрыв произошел

30 марта 1956 г. За четыре года до извержения вблизи Северо-Курильска на глубине 20 км произошло катастрофическое Камчатское землетрясение с $M_w = 9.0$ (1952 г.), породившее громадное цунами (был уничтожен город Северо-Курильск на о. Парамушир) (MacInnes et al., 2010).

Извержение вулкана Эль-Чичон стало крупнейшим в современной истории Мексики (De la Cruz-Reyna, Martin Del Pozzo, 2009). Оно предварялось землетрясением в Плайя-Асуль (24 октября 1981) с $M_w = 7.2$ (рис. 2а). Отметим, что после извержения вулкана Эль-Чичон (1982 г.) с задержкой в три года также произошло очень сильное землетрясение с $M_w = 8.0$.

С другой стороны, в работе (Sauers, 1986) показано, что сильнейшее землетрясение 7.05.1986, $M_w = 7.7$ с очагом в районе Крысыных островов, предварялось цепочкой мигрирующих вдоль Алеутской дуги извержений вулканов, которые можно рассматривать как форшоковые явления.

О подобной последовательности событий также говорится в книге С.П. Крашенинникова (1994), являвшегося первым исследователем Камчатки. Он писал, что извержение Авачинской сопки летом 1737 г. продолжалось более суток и закончилось выбросом огромной пепловой тучи. После этого извержения на Курильской Лопатке (на юге Камчатки) и островах (Курильских) было сильное землетрясение, сопровождавшееся несколькими волнами цунами (это, по нашему мнению, фактически означает, что магнитуда землетрясения была более 7.5).

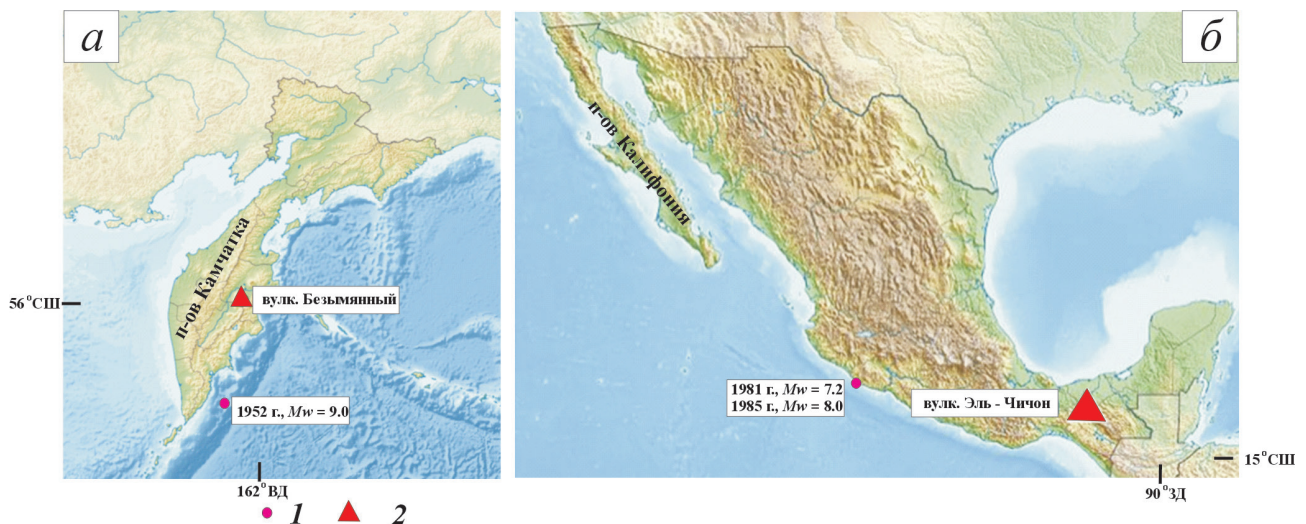


Рис. 2. Примеры парных событий сильных землетрясений и активизации крупных вулканов для Камчатки (а) и южной части Кордильер в Северной Америке (б): 1 — эпицентр землетрясения; 2 — расположение вулкана. Цифрами обозначены годы и магнитуды землетрясений.

Fig. 2. Examples of paired events of strong earthquakes and activation of large volcanoes for Kamchatka (a) and the southern part of the Cordillera in North America (b): 1 — earthquake epicenter, 2 — volcano location. Numbers indicate years and magnitudes of earthquakes.

В представленных данных имеет место последовательность в виде сильного землетрясения с магнитудой 7.5–9.0 и катастрофически мощного извержения крупного вулкана (сила более 6 баллов, выбросы более 10 км^3) или активизацией вулканической группы, протягивающихся иногда на расстоянии в сотни километров (сила более 5 баллов, выбросы более 1 км^3). Несмотря на задержку извержений вулканов после сильных землетрясения в несколько лет, случайным совпадением, по нашему мнению, это сложно назвать, т.к. очень часто активизировавшиеся вулканы молчали десятки и иногда сотни лет.

Конечно, отмеченные последовательности возникновения сильных сейсмических и вулканических событий требуют более тщательного обзора. В настоящей работе представлен механизм механического взаимодействия этих двух явлений, позволяющий обосновать прямую и обратную их взаимосвязь.

О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ЗОН СУБДУКЦИИ И ОБЛАСТЕЙ ВУЛКАНИЗМА

Общепринятые представления. Из теории тектоники литосферных плит, сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений и тектонофизических данных известно, что в коре континентов и островных дуг зон субдукции имеет место режим напряженного состояния горизонтального сжатия (Теркот, Шуберт, 1985). Здесь наибольшим является напряжение горизонтального сжатия, которое субортогонально простиранию тальвега океанического желоба и больше по величине вертикальных сжимающих напряжений, близких по значению к весу вышележащего столба горных пород.

С другой стороны, понятно, что активизация вулканизма должна обеспечиваться повышением проницаемости разломных систем, с ними связанным. Это, в частности, было показано в монографии (Злобин и др., 2012) на примере грязевых вулканов о. Сахалина. Такое повышение проницаемости может быть связано с достижением критического давления в магматической камере, а может быть обеспечено снижением уровня горизонтального сжатия в окружающих породах. Таким образом, напряженное состояние коры в виде горизонтального растяжения должно способствовать активизации вулканизма, что было отмечено в работе (Федоров, 2006). В этом случае наименьшее сжатие субгоризонтально и меньше веса вышележащих горных пород. Именно в случае такого напряженного состояния существует возможность расплавленной магме из подкорового и промежуточного (находящегося в коре) магматического очага подняться вверх по

субвертикальному магмопроводящему разлому, раздвигая его борта.

Все эти положения часто можно услышать на специализированных научных конференциях при обсуждении проблемы активизации вулканической деятельности. При этом в стороне остается вопрос о том, как это напряженное состояние, благоприятное для активизации вулканизма, может возникнуть в зонах континентальной коры или островной дуги зон субдукции. Хотя вулканические цепочки и не располагаются в непосредственной близости к зоне столкновения океанической и континентальной (субконтинентальной) литосферных плит, но все равно необходимо объяснить, почему расстоянии в 200–300 км до фронта вулканической деятельности происходит изменение режима напряженного состояния.

Тектонофизика о напряжениях в зонах субдукции. Как показывают результаты тектонофизической реконструкции напряжений (Ребецкий, Маринин, 2006; Rebetsky et al., 2016; Rebetsky, Tatevossian, 2013), выполненной по сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений активных континентальных окраин, в верхней части коры напряжение наибольшего сжатия ориентировано субортогонально простиранию тальвега океанического желоба с погружением под него с углами 25–35°. Соответственно, напряжение минимального сжатия (максимальное девиаторное растяжение) субвертикально, а промежуточное главное напряжение субгоризонтально и субпараллельно простиранию океанического желоба.

Из результатов реконструкции природных напряжений в очаговой зоне катастрофического землетрясения Тохоку (2011, Mw = 9.0) (Rebetsky et al., 2016), видно, что на фоне сделанного выше обобщения напряженного состояния существуют и вариации ориентации главных напряжений. При этом, если для континентальной коры в зоне океанского желоба до его тальвега практически везде наблюдается режим горизонтального сжатия, то для коры островной дуги наряду с этим состоянием существуют также обширные области напряженного состояния горизонтального сдвига (рис. 3а).

Для более глубоких горизонтов (рис. 3б–г) данные о поле напряжений имеются в большей части для коры восточного побережья о. Хонсю и к востоку от него вплоть до тальвега океанского желоба. Также отметим, что в океанической литосфере к востоку от тальвега желоба действует режим горизонтального растяжения с ориентацией наибольшего горизонтального сжатия вдоль желоба, а наименьшего ортогонально ему.

В более глубоких слоях коры о. Хонсю, в тех зонах, где отсутствуют данные о напряжениях по

О МЕХАНИЗМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

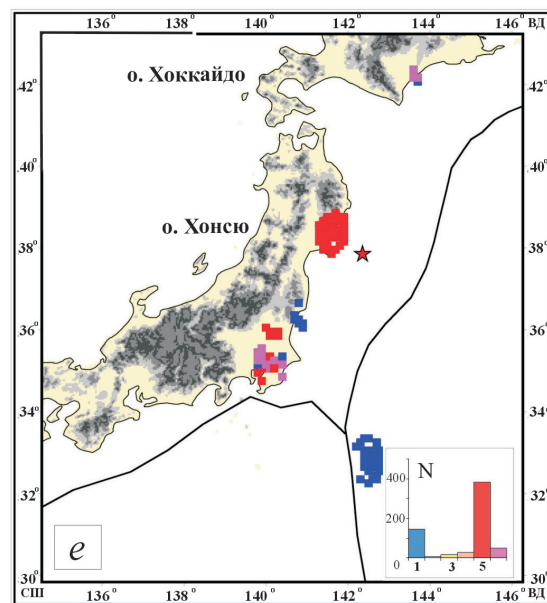
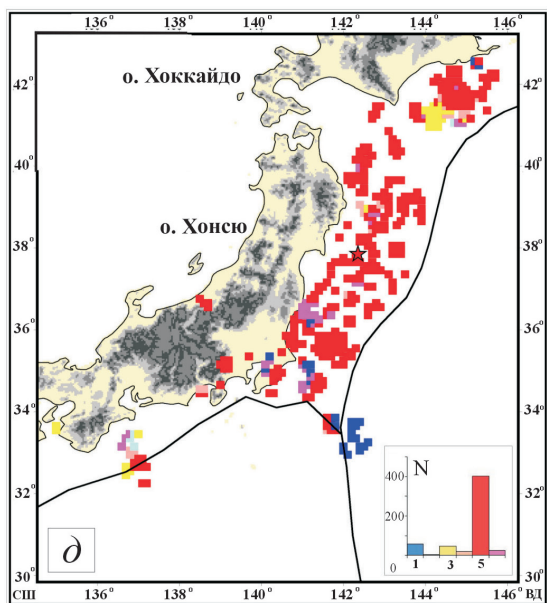
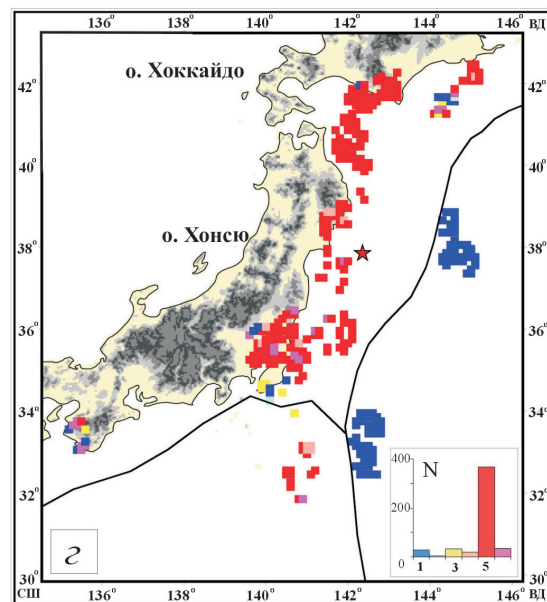
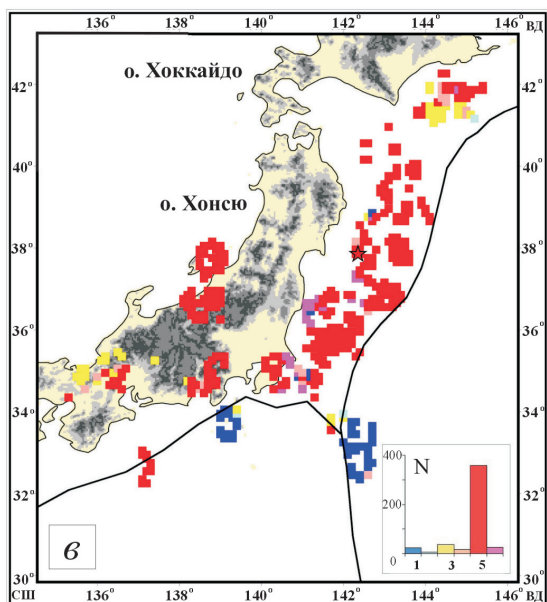
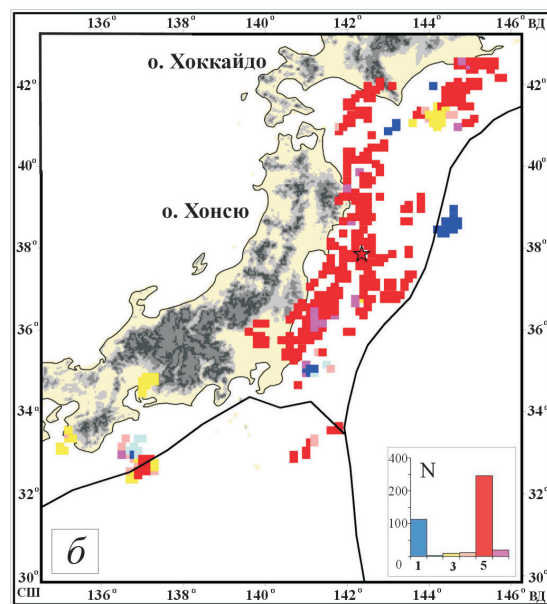
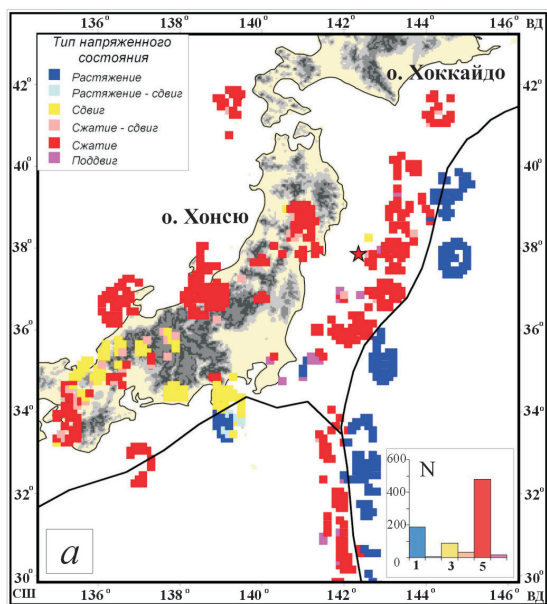


Рис. 3. Геодинамический тип напряженного состояния коры Японии для разных глубинных уровней, полученный из тектонофизической реконструкции по сейсмологическим данным за период 1994–2011 гг. (до землетрясения Тохоку 07.03.2011) (Ребецкий, Полец, 2014; Rebetsky et al., 2016) для диапазона глубин: менее 20 км (а); от 10 до 30 км (б); от 20 до 40 км (в); от 30 до 50 км (г); от 50 до 70 км (д); от 70 до 90 км (е). Звездочка — эпицентр землетрясения Тохоку 2011 г. (глубина гипоцентра 24 км). На диаграмма внизу справа по вертикали показана частота распределения N (по вертикали) разных типов геодинамических режимов (по горизонтали).

Fig. 3. Geodynamic type of the stress state of Japan crust for different depth levels, obtained from tectonophysical reconstruction based on seismological data for the period 1994–2011 (before the Tohoku earthquake 07.03.2011) (Rebetsky, Polets, 2014; Rebetsky et al., 2016) for the depths range: less than 20 km (a); 10 to 30 km (b); 20 to 40 km (v); 30 to 50 km (g); 50 to 70 km (d); 70 to 90 km (e). Asterisk is the epicenter of the 2011 Tohoku earthquake (hypocenter depth is 24 km). The diagram at the bottom right shows the frequency of distribution N (vertical) of different types of geodynamic regimes (horizontal).

результатам тектонофизической реконструкции, можно с большой долей вероятности предположить, что здесь имеет место горизонтальное растяжение и его генезис связан с действием массовых сил тяжести.

Сопоставляя режим напряженного состояния верхней части острова Хонсю с расположением главных вулканов, активных в последние 2000 лет (рис. 4), замечаем, что большая их часть попадает в участки коры с режимом горизонтального сдвига и даже растяжения (небольшие вулканические острова Изу-Ошима и Миякияма к югу от о. Хонсю), а остальные — зоны, где нет данных о напряжениях. Таким образом, мы видим, что активные вулканы избегают расположения в зонах повышенного горизонтального сжатия, превышающего уровень вертикальных напряжений, и при этом не обязательно должен иметь место режим горизонтального растяжения.

Влияние сильных землетрясений на напряженное состояние зон субдукции. Как уже было сказано, обобщение напряженного состояния (рис. 4) для зоны субдукции Японской островной дуги (рис. 3) получено по данным о механизмах очагов землетрясений, произошедшим до катастрофического землетрясения Тохоку (2011 г., $M_w = 9.0$). После этого землетрясения режим напряженного состояния верхних слоев коры резко изменился. Если до землетрясения Тохоку в коре островной дуги основными механизмами очагов землетрясений являлись взбросы, то на афтершоковой стадии на обширной площади очага этого землетрясения стали наблюдаться сбросы.

Такая резкая смена кинематического типа разрывообразования иногда наблюдалась и при других достаточно сильных землетрясениях. Однако подобные изменения носили очень локальный характер и со временем быстро исчезали. Особенностью афтершокового процесса землетрясения Тохоку являлась обширность области смены механизмов очагов землетрясений, и то, что по прошествии более 10 лет после сильного землетрясения здесь в большей части

его очага сохранился сейсмический режим с преимущественным наличием механизмов очагов землетрясений в виде сбросов.

В работе (Ребецкий, Полец, 2021) выполнялась тектонофизическая реконструкция напряжений коры Японской островной дуги по сейсмологическим данным в период 2011–2018 гг. (после землетрясения Тохоку 07.03.2011). В верхней части (глубины до 20 км) в основном наблюдается режим горизонтального растяжения, для которого напряжения наибольшего сжатия субвертикальны (рис. 5). При этом два других главных напряжения, которые действуют в субгоризонтальном направлении (наименьшее сжатие и промежуточное главное напряжение) крайне неустойчивые своей ориентации и достаточно часто сменяют друг друга по направлениям. Это говорит о том, что их величины близки к друг другу. На трех следующих диапазонах глубин происходит постепенное уменьшение площади, на которой наблюдается режим горизонтального растяжения.

Таким образом, на глубине более 50 км практически повсеместно имеет место режим горизонтального сжатия, т.е. он здесь не изменился после землетрясения Тохоку. Выполненные в работе (Ребецкий, Полец, 2021) исследования показали, что объяснение факта резкого по характеру и большого по площади изменения напряженного состояния в верхних слоях коры в очаговой области Тохоку землетрясения связано с невысоким уровнем напряжений горизонтального сжатия, которые действовали в коре островной дуги до землетрясения.

Установлено, что превышение этих напряжений над литостатическим давлением (вертикальное напряжение) составляет порядка 3–5 бар (Ребецкий, Полец, 2021). Именно поэтому больше-амплитудные косейсмические горизонтальные перемещения верхнего слоя, отраженные в данных GPS наблюдений (Sato et al., 2011), уменьшили горизонтальное сжатие на 10 бар, что привело к смене геодинамического типа напряженного состояния в верхнем диапазоне глубин.

Можно резонно предположить (рис. 5), что уменьшение уровня горизонтального сжатия могло захватить и кору о. Хонсю, просто эти изменения напряжений не привели к радикальной смене геодинамического режима напряженного состояния.

Столь длительное (>10 лет) существование режима горизонтального растяжения в обла-

сти очага землетрясения Тохоку подводит нас вопросу, как долго это еще будет продолжаться и какие явления способны снова формировать здесь режим горизонтального сжатия? Если считать, что источником напряжений горизонтального сжатия являются медленные горизонтальные движения, вызываемые силами тяжести погруженного слэба, то, рассматривая

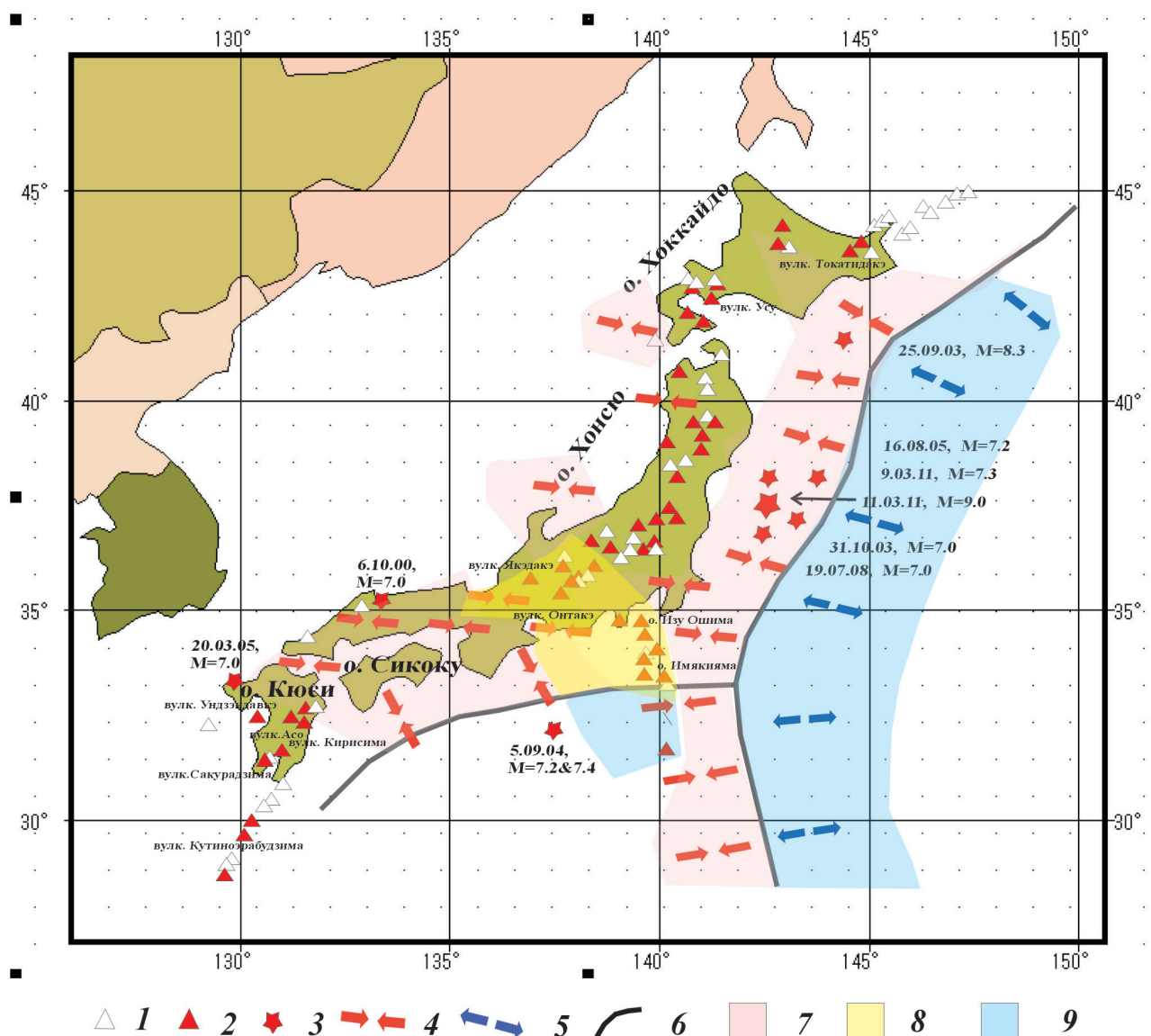


Рис. 4. Вулканы Японской островной дуги, наиболее сильные землетрясения с начала 21 века и обобщение напряженного состояния, действовавшего в коре островной части зоны субдукции до землетрясения Тохоку 2011 г. по результатам тектонофизической реконструкции (Ребецкий, Полец, 2014; Rebetsky et al., 2016). 1, 2 — вулканы, включая постоянно наблюдаемые (2); 3 — эпицентры сильных землетрясений; 4 — напряжения наибольшего горизонтального сжатия; 5 — девиаторные напряжения наибольшего растяжения; 6 — границы плит; 7, 8, 9 — области напряженного состояния горизонтального сжатия, сдвига и растяжения, соответственно.

Fig. 4. Volcanoes of the Japanese island arc, the strongest earthquakes since the beginning of the 21st century, and a generalization of the stress state acting in the crust of the island part of the subduction zone before the 2011 Tohoku earthquake based on tectonophysical reconstruction (Rebetsky, Polets, 2014; Rebetsky et al., 2016). 1, 2 — volcanoes, including permanently observed (2); 3 — epicenters of strong earthquakes; 4 — stresses of greatest horizontal compression; 5 — deviator stresses of greatest tension; 6 — plate boundaries; 7, 8, 9 — areas of stress state of horizontal compression, shear and tension, respectively.

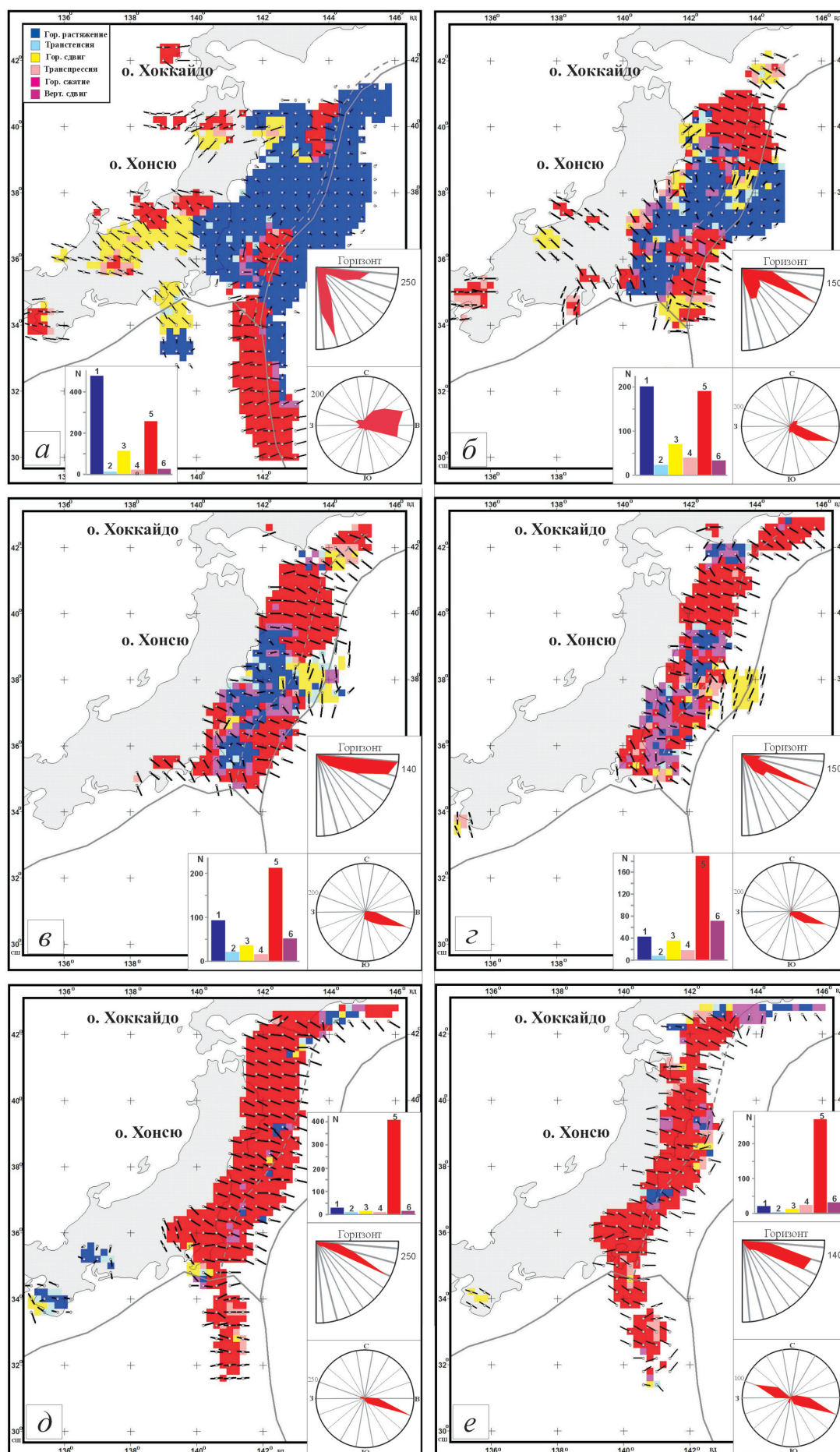


Рис. 5. Геодинамический тип напряженного состояния коры Японии для разных глубинных уровней, полученный из тектонофизической реконструкции по сейсмологическим данным за период 2011-2018 гг (после землетрясения Тохоку 07.03.2011) (Ребецкий, Полец, 2021) для диапазона глубин: *a* — менее 20 км; *б* — от 10 до 30 км; *в* — от 20 до 40 км; *г* — от 30 до 50 км; *д* — от 50 до 70 км; *е* — от 70 до 90 км. Внизу справа показаны роза-диаграммы представительности азимутов простирания и углов погружения напряжений наибольшего сжатия. Здесь также представлены диаграммы представительности (N) геодинамических типов напряженного состояния.

Fig. 5. Geodynamic type of the stress state of the crust of Japan for different depth levels, obtained from tectonophysical reconstruction based on seismological data for the period 2011-2018 (after the Tohoku earthquake of 07.03.2011) (Rebetsky, Polets, 2021) for the depth range: *a* — less than 20 km; *б* — 10 to 30 km; *в* — 20 to 40 km; *г* — 30 to 50 km; *д* — 50 to 70 km; *е* — 70 to 90 km. Bottom rights show the rose diagrams of the representativeness of strike azimuths and dip angles of stresses of the greatest compression. The diagrams of representativeness of (N) geodynamic stress types are also shown.

достаточно типичные скорости деформаций, получаемые в GPS наблюдениях в 10^{-8} – 10^{-9} год $^{-1}$, для создания дополнительного сжатия в 10 бар необходимо около десяти тысяч лет (?).

Геомеханика о напряженном состоянии коры в областях вулканизма. Теперь рассмотрим механизм проникновения магмы в каналы-разломы. Геомеханические расчеты и физическое моделирование магматических даек показывают, что механизм их продвижения вверх связан с превышением давления магмы

$$P_m = P_m^0 + hg \rho_m, \quad (1)$$

над уровнем напряжений горизонтального сжатия (σ_{xx}), действующих на вертикальных стенках дайки (рис. 6):

$$P_m \geq |\sigma_{xx}|. \quad (2)$$

В выражении (1) *h* — вертикальная дистанция по трещине, по которой от кровли магматического очага идет распространение магмы, *g* — ускорение силы тяжести, ρ_m — плотность самой магмы, а P_m^0 — давление магмы в подкоровом очаге.

Согласно (1) давление магмы в вертикальном разломе-канале определяется давлением в магматическом очаге (P_m^0) и весом столба магмы в канале от ее фронта до кровли очага (снижение давления на величину веса нижележащего столба магмы) (Rubin, 1995). Как только давление магмы во фронте дайки становится ниже напряжений горизонтального сжатия и условие (2) не выполняется, магма перестает продвигаться по разрыву. Таким образом, давление магмы во фронте ее распространения обуславливается давлением в магматическом очаге и плотностью магмы (1), а условие (2) определяет глубину продвижения вверх магмы по магмопроводящему разлому.

В свою очередь, давление магмы во внутрикоровом очаге определяется средним давлением в окружающих его породах коры. В самом первом приближении давление в очаге можно считать равным литостатическому, т.е. весу столба пород, лежащих над ним. Это приближение наиболее

подходит для случая субгоризонтального расположения магматического очага при больших его горизонтальных размерах в сравнении с вертикальным ($> 10:1$).

Для режима горизонтального растяжения в случае более изометричной геометрии очага давление магмы в нем будет несколько меньше литостатического, а при режиме горизонтального сжатия — несколько больше литостатического. На стадии активизации магматического очага, вызванного поступлением в него из мантии дополнительных порций магмы, можно предположить небольшое увеличение давления магмы в сравнении с указанными выше вариациями. Если исходить из критерия продвижения магмы по вертикальному разрыву (2) и полагать давление магмы в очаге с небольшими вариациями близким к литостатике, то можно оценить, в каких случаях напряженных состояний возможно излияния магмы на поверхность, а в каких такого излияния быть не может.

Продвижение магмы по разлому (каналу) приводит к раздвиганию его стенок и, следовательно, к деформациям массива за пределами разлома. Это в свою очередь должно изменять напряжения в породах, окружающий разлом. Далее рассмотрим примеры тектонофизической оценки эволюции напряженного состояния коры для разных геодинамических типов напряженных состояний, существующих до активизации магматического очага. Считаем, что простирание магмопроводящего разлома совпадает с горизонтальной осью *y*, а нормалью в горизонтальной плоскости является ось *x*.

Во всех ниже приведенных примерах считается, что два главных напряжения в коре направлены горизонтально, а одно вертикально. Полагаем, что для начального состояния (верхний индекс 0) напряжения, действующие в горизонтальном направлении, равны друг другу ($\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0$), а вертикальные напряжения равны весу пород на данной глубине и они не меняются в процессе активизации магматизма коры ($\sigma_{zz} = -p_{lt} = -hg \rho_c$, сжимающие напряжения отрицательные).

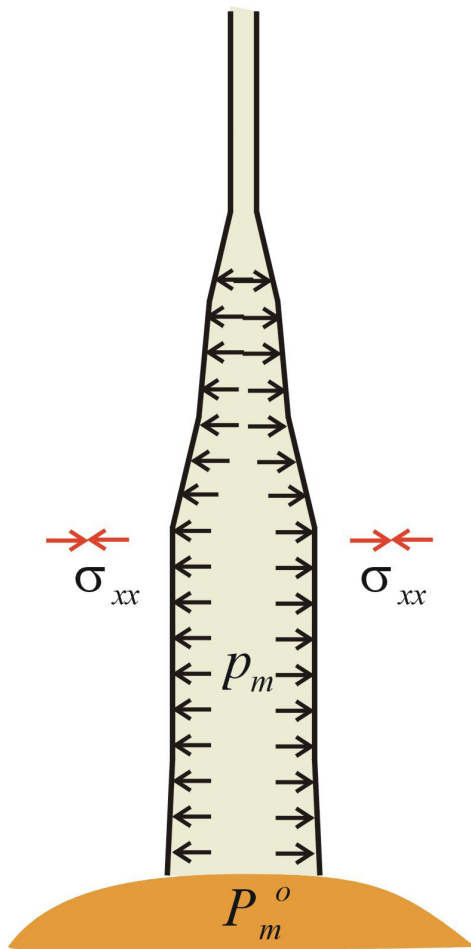


Рис. 6. Схема сил, определяющих давление и напряжения в системе вертикальный магматический канал — разлом, магматический очаг и в окружающих разлом породах. Пояснение в тексте.

Fig. 6. Diagram of forces determining pressure and stresses in the system of vertical magmatic channel and a fault, magmatic chamber and in the rocks surrounding the fault. Explanation in the text.

Рассматривались два варианта давления в магматическом очаге, отвечающие изометричной его форме в плане. В первом оно равно литостатическому давлению, а во втором несколько больше. Также в расчетах варьировалась плотность магмы ρ_m . Она принималась меньшей и большей плотности пород ρ_c . Глубина расположения магматического очага отвечает 20 км.

Напряженное состояние горизонтального растяжения и вулканизм. Рассмотрены два начальных состояния, в которых вертикальное сжатие в коре всюду больше горизонтальных напряжений — режим горизонтального растяжения (рис. 7).

Поскольку давление магмы в магматическом очаге $P_m^o \geq P_{lt}(H_o)$, то для случая плотности магмы меньшей, чем плотность окружающих пород, давление магмы P_m в магмопроводящем разломе везде выше горизонтального сжатия.

Это позволяет магме достигнуть поверхности коры. При этом давление магмы определяет повышение уровня горизонтальных напряжений сжатия, нормальных к разлому, для конечного напряженного состояния ($|\sigma_{xx}^1| = -P_m > |\sigma_{xx}^0|$).

Таким образом, после магматического излияния на поверхности и остывания магмы в разломе в его окрестности устанавливается новый режим напряженного состояния (рис. 7, красная линия), при котором главное напряжение наибольшего сжатия будет действовать уже в горизонтальном направлении. Поскольку при этом второе из напряжений, действовавшее в горизонтальном направлении ($\sigma_{xx}^1 \approx \sigma_{xx}^0$), изменяется мало (на рис. 7 оно в начальном и конечном состоянии одно и то же), то произойдет изменение геодинамического режима горизонтального растяжения на режим горизонтального сдвига (промежуточным главным напряжением становится вертикальное напряжение).

Существует устойчивое представление о движущей силе поднятия магмы вверх по разлому-каналу, связанному с меньшей ее плотностью, чем плотность окружающих пород. При большей плотности магмы происходит более быстрое снижения ее давления в канале при уменьшении глубины. Магма продвигается вверх и при плотности, большей чем плотность окружающей породы (рис. 7б, 7г). При этом практически на всей дистанции давление магмы меньше литостатического. Главным здесь является то, что уровень давления в канале больше, чем уровень напряжений горизонтального сжатия. Поэтому при невысоком давлении магмы во внутрикоровом магматическом очаге магма не может дойти до поверхности и на глубине около 1 км происходит закрытие разлома. Поскольку в точке D (рис. 7б) давление магмы меньше вертикальных (литостатика) и горизонтальных напряжений, то это означает, что канал остается “слепым”, здесь не образуется плутонического магматического очага.

Для всех рассмотренных вариантов расчета (рис. 7) для глубин распространения магмы вверх по разлому-каналу в окружающих его массиве резко повышается уровень напряжений горизонтального сжатия, действующих по нормали к разлому, и изменяется тип напряженного состояния на горизонтальный сдвиг. То есть, даже в том случае, когда проявления вулканизма на поверхности нет (рис. 7б), все равно эффект повышения напряжений горизонтального сжатия в большей части глубин коры вблизи магмопроводящего разлома имеется. В этой связи далее в работе будем говорить не только об активизации вулканизма, а более широко понимать проблему, определяя ее как активизацию магматизма в коре.

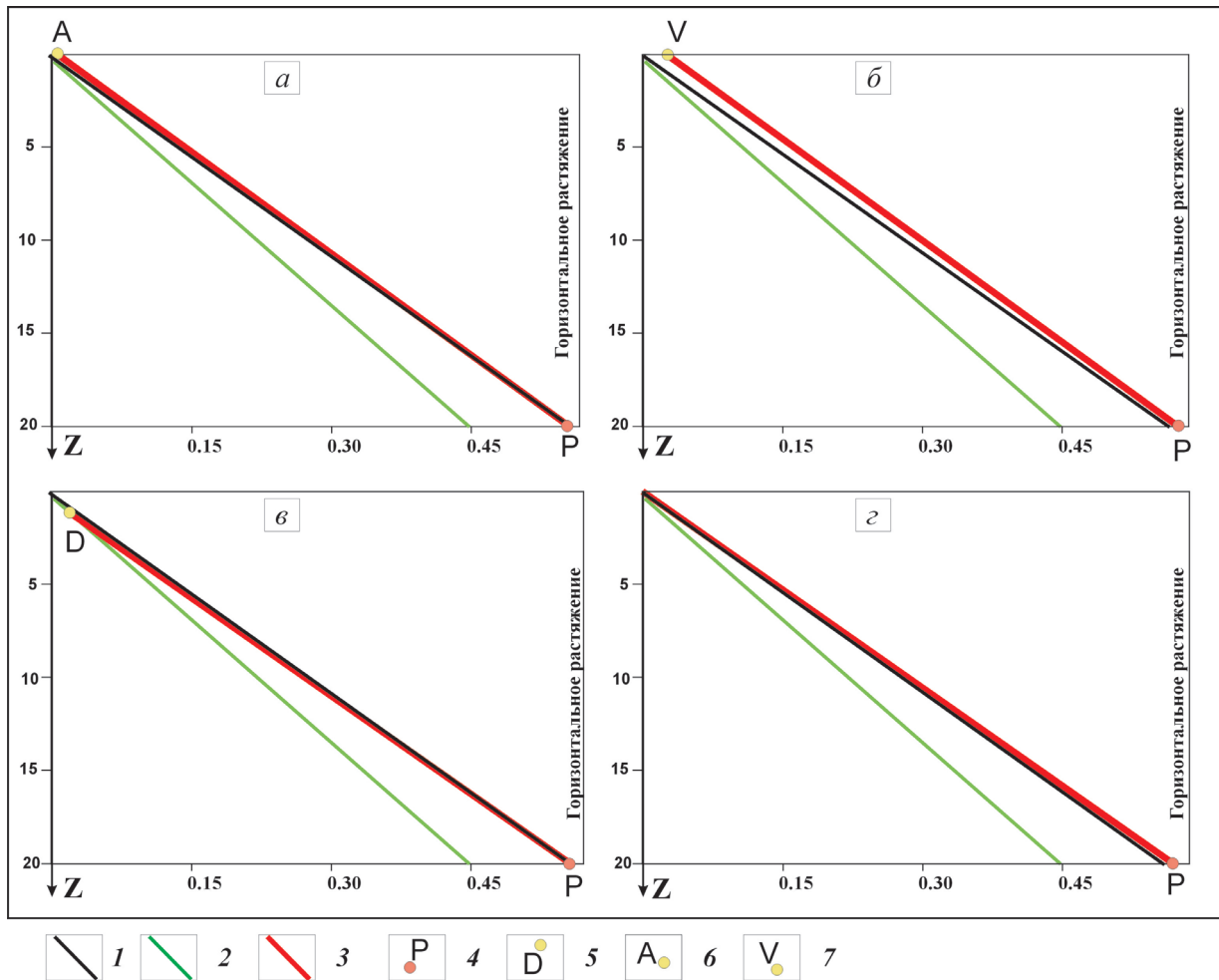


Рис. 7. Схемы распределения по глубине конечного напряженного состояния коры при одинаковом начальном напряженном состоянии, отвечающем режиму горизонтального растяжения. Два случая давления магмы в мантийном очаге, расположенном на глубине $H_o = 20$ км: (а, в) $P_m^o = p_{lt}(H_o)$, (б, г) $P_m^o > p_{lt}(H_o)$ и для (а, б) $\rho_c > \rho_m$, (в, г) $\rho_c < \rho_m$. 1 — вертикальные напряжения (литостатическое давление) $\sigma_{zz} = -p_{lt}$ начального и конечного напряженных состояний; 2 — горизонтальные напряжения $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0$ начального напряженного состояния; 3 — давление магмы P_m в разломе и уровень напряжений горизонтального сжатия $\sigma_{xx}^1 \neq \sigma_{yy}^1$ конечного состояния; 4 — уровень давления магмы в магматическом очаге; 5 — глубина остановки фронта продвижения магмы по разлому; 6, 7 — давление магмы на поверхности, отвечающее определенному типу излияния. По вертикали — глубина в километрах, по горизонтали напряжения и давление в ГПа. Пояснения в тексте.

Fig 7. Schemes of the depth distribution of the final stress state of the crust with the same initial stress state corresponding to the horizontal tension regime for two cases of initial magma pressure in a mantle chamber located at a depth of $H_o = 20$ km: (а, в) $P_m^o = p_{lt}(H_o)$, (б, г) $P_m^o > p_{lt}(H_o)$ and for (а, б) $\rho_c > \rho_m$, (в, г) $\rho_c < \rho_m$. 1 — vertical stresses (lithostatic pressure) $\sigma_{zz} = -p_{lt}$ of initial and final states; 2 — horizontal stresses $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0$ of the initial stress state; 3 — magma pressure P_m in the fault and the stress level of horizontal compression $\sigma_{xx}^1 \neq \sigma_{yy}^1$ of the final state; 4 — magma pressure level in the magmatic chamber; 5 — the depth of magma front advance stop along the fault; 6, 7 — magma pressure on the surface corresponding to the certain type of effusion. On the vertical — depth in kilometers, on the horizontal — stress and pressure in GPa. Explanations in the text.

Следует отметить, что характер распространения магмы по разлому не изменится, если сжимающие напряжения, действующие вдоль разлома σ_{yy}^0 , будут больше горизонтального напряжения σ_{xx}^0 и даже больше вертикального напряжения σ_{zz}^0 . При этом в первом случае начальный режим напряженного состояния остается горизонтальным растяжением, а во втором становится горизонтальным сдвигом.

Изменится геодинамический тип конечного напряженного состояния во втором случае. Здесь он будет не горизонтальным сдвигом, как это имеет место на рис. 7, а горизонтальным сжатием, т.к. оба горизонтальных сжимающих главных напряжения больше вертикального сжатия.

Нами рассматривался случай продвижения магмы по протяженному разлому (рис. 7). Однако он может также соответствовать и случаю, когда

основные каналы поступления магмы изометричные (цилиндрические) в плане, но при этом активизируется группа вулканов, расположенных на одном или системе субпараллельных магмопроводящих разломах. Это достаточно типичная ситуация для вулканизма зон субдукции (Федоров, 2006).

Если следовать положениям теории упругости, то можно ожидать, что по латерали зона измененного напряженного состояния (смена горизонтального растяжения на горизонтальное сжатие) будет иметь линейный размер, в 2–4 раза превышающий горизонтальную протяженность магмопроводящего разлома. В случае продвижения магмы вверх от очага по единичному изометричному каналу (в виде цилиндра) повысится уровень обоих главных напряжений, действовавших в горизонтальном направлении и таким образом в конечном состоянии будет режим горизонтального сжатия. При этом в плане, согласно упругим решениям механики (Ребецкий, 2007), область измененного напряженного состояния будет небольшой, около 3–5 радиусов вулканической постройки, т.е. приблизительно 10–50 км.

Напряженное состояние горизонтального сжатия и внутрикоровый магматизм. Теперь рассмотрим два других случая начального напряженного состояния коры. Здесь также полагаем, что в коре вертикальный градиент горизонтальных напряжений такой же, как и на рис. 7, при этом существует дополнительное боковое обжатие, одинаковое по всей мощности коры в 820 бар (рис. 8). Выбор такого значения определялся в необходимости создания для верхней части коры (глубины 5–10 км) режима горизонтального сжатия. Во всех случаях расчетов в верхней части коры наблюдается режим горизонтального сжатия, а в нижней действует режим горизонтального растяжения.

Таким образом, распространение магмы вверх по субвертикальному магмопроводящему разлому приводит к повышению уровня напряжений горизонтального сжатия, действующих в ортогональном к разлому направлении. Это означает, что конечное напряженное состояние ниже точки D в зависимости от варьируемых в представленных расчетах параметров (P_m^0) может быть либо горизонтальным сжатием, или перейти в режим горизонтального сдвига. Главным результатом проведенного анализа является тот факт, что даже при наличии режима горизонтального растяжения в большей части коры наличие высокого уровня горизонтального сжатия в верхней части коры препятствует излиянию лавы на поверхность.

Магма имеет возможность подняться до определенных глубин коры (рис. 8, точка D).

В диапазоне глубин проникновения магмы в разлом (ниже точки D) в коре возрастает интенсивность напряжений горизонтального сжатия, нормального к простиранию разлома, до значений давления магмы. Из приведенных оценок напряжений следует, что давление магмы в разломе ниже точки D больше, чем литостатическое давление. Это означает, что новый уровень напряжений горизонтального сжатия здесь также будет больше напряжений вертикального сжатия, т.е. на этих глубинах возникает режим горизонтального сжатия.

Важно отметить, что в трех из четырех рассмотренных случаях в местах прекращения подъема магмы по разлому формируется внутрикоровая интрузия (рис. 8а, 8б, 8г). Таким образом, от магмопроводящего разлома могут возникать новые более близкие к поверхности плутонические магматические очаги. В них будет накапливаться магма, но ее продвижение вверх будет невозможно из-за сильного горизонтального сжатия в вышележащих породах.

Выполненный анализ позволяет утверждать, что в случае наличия магматических очагов в нижней части коры или литосферы для любого случая распределения напряженных состояний по глубине коры (рис. 7, 8) должно происходить продвижение магмы вверх по субвертикальным разломам, в результате которого та глубинная часть коры, которая находилась в состоянии горизонтального растяжения, переходит в состояние горизонтального сдвига или сжатия.

ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам анализа эволюции напряженного состояния в зонах вулканизма и сильных землетрясений можно заключить, что оба эти явления способны коренным образом менять напряженное состояние зон субдукции. При этом если активизация вулканов способна приводить к изменению напряженного состояния с горизонтального растяжения на горизонтальное сжатие, то сильнейшие землетрясения, наоборот, способны изменить режим горизонтального сжатия на горизонтальное растяжение. Этот результат позволяет сделать вывод о сопряженности таких явлений, как мощные фазы вулканизма и катастрофические землетрясения зон субдукции.

В настоящее время общепризнаны два силовых фактора, обеспечивающих режим поддвига океанической литосферной плиты под континентальную (субконтинентальную) литосферу (Ребецкий, 2020; Теркот, Шуберт, 1985). Первый из них связан с давлением со стороны океанской зоны спрединга, а второй — с тяговыми усилиями, возникающими в глубине мантии

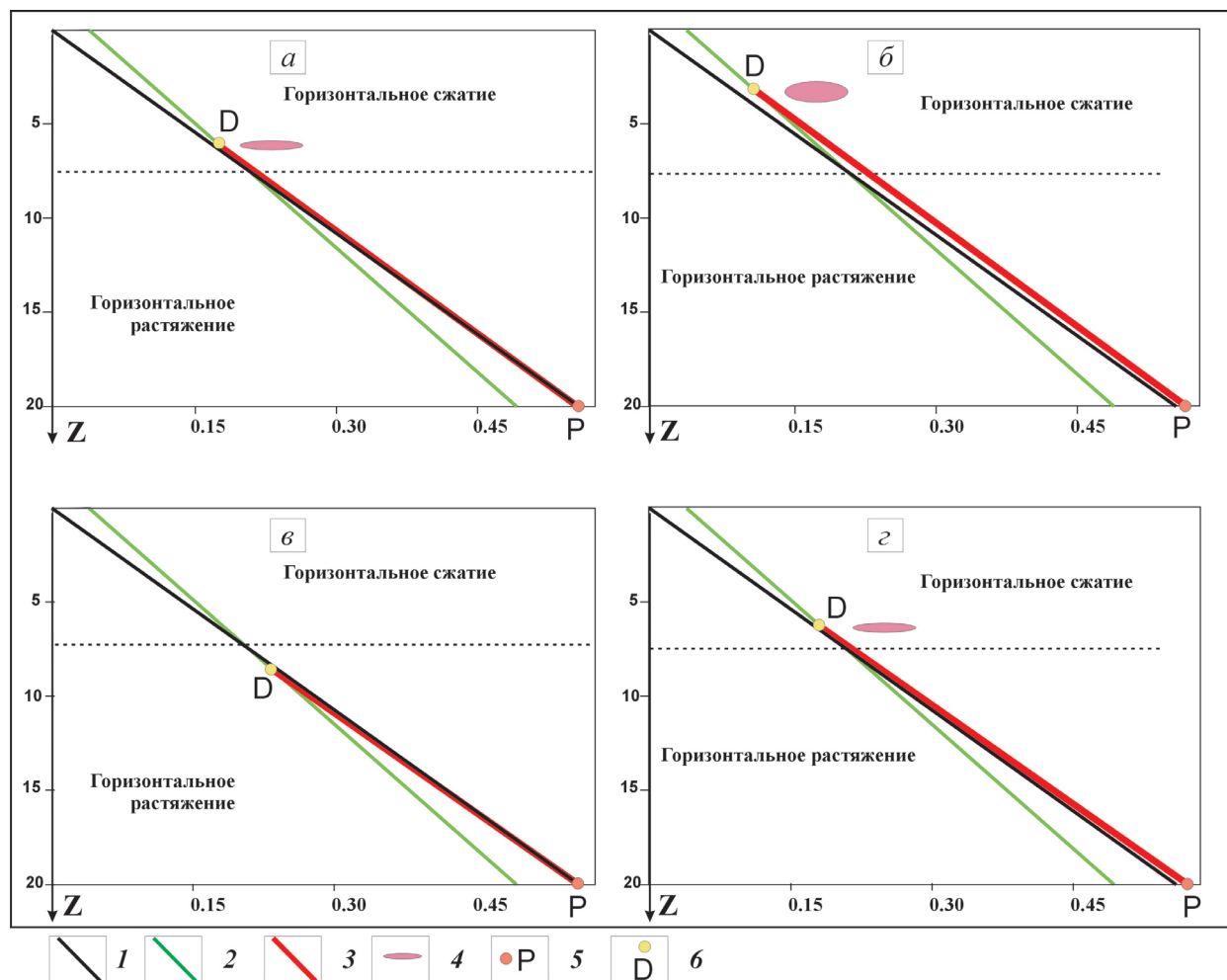


Рис. 8. Схемы распределения по глубине начальных и конечных напряжений в коре при начальном напряженном состоянии, отвечающем режиму горизонтального сжатия в верхней части и горизонтального растяжения в нижней части коры до начала магматизма. Два случая давления магмы в мантийном очаге (глубина $z = H_o = 20$ км: (а, в) $P_m^0 = p_{lt}(H_o)$, (б, г) $P_m^0 > p_{lt}(H_o)$) и при (а, б) $\rho_c > \rho_m$, (в, г) $\rho_c < \rho_m$. 1 — вертикальные напряжения (литостатическое давление) $\sigma_{zz} = -p_{lt}$ начального и конечного напряженных состояний; 2 — горизонтальные напряжения $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0$ начального напряженного состояния; 3 — давление магмы P_m в разломе и уровень напряжений горизонтального сжатия $\sigma_{xx}^1 \neq \sigma_{yy}^1$ конечного состояния; 4 — глубины, на которых могут формироваться горизонтальный магматический очаг; 5 — уровень давления магмы в магматическом очаге; 6 — глубина остановки фронта продвижения магмы по разлому. По вертикали — глубина в километрах, по горизонтали напряжения и давление в ГПа.

Fig 8. Schemes of the initial and final stresses distribution by depth in the crust with the initial stress corresponding to horizontal compression in the upper part of the crust and horizontal extension in its lower part, prior to magmatism. Two cases of magma pressure in the mantle magmatic chamber (at a depth of $z = H_o = 20$ km: (а, в) $P_m^0 = p_{lt}(H_o)$, (б, г) $P_m^0 > p_{lt}(H_o)$) and for (а, б) $\rho_c > \rho_m$, (в, г) $\rho_c < \rho_m$. 1 — vertical stresses (lithostatic pressure) $\sigma_{zz} = -p_{lt}$ of initial and final stress states; 2 — horizontal stresses $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0$ of the initial stress state; 3 — magma pressure P_m in the fault and the level of stresses of horizontal compression $\sigma_{xx}^1 \neq \sigma_{yy}^1$ of the final state; 4 — the depths at which horizontal magmatic chamber may be formed; 5 — magma pressure level in the magmatic chamber; 6 — the depth at which the magma stop advancing along the fault. Vertical line — depth in kilometers, horizontal line — stress and pressure in GPa.

со стороны океанической литосферы — слэба, погруженной и увеличившей свою плотность в результате метаморфических преобразований (Wilson, 1966).

При этом с самого начала формирования этих взглядов периодически возникали дискуссии о преимуществе (первичности) какого-то одного из этих факторов (Elsasser, 1969). Постепенно нако-

пившиеся сейсмологические данные по механизмам очагов землетрясений (Global Centroid Moment Tensor Catalog — <https://globalcmt.org>), возникающих в океанической части литосферы, позволили в результатах тектонофизической инверсии напряжений показать, что в тылу зон субдукции за тальвегом желоба, ортогонального его простиранию (рис. 4), действуют напряжения

минимального сжатия (максимального девиаторного растяжения) (Ребецкий, 2020; Ребецкий, Полец, 2014). Это фактически говорит о том, что в океанической литосферной плите нет давления со стороны зоны спрединга и значит, верна точка зрения Эльзассера о причине поддвижения океанической плиты (рис. 9а).

После сильного межплитного землетрясения, происходящего между тальвегом океанического желоба и континентом (островной дугой), имеет место его надвигание на океанскую плиту и смещение последней вниз в мантию. То есть наблюдается типичный механизм ролл-бэк субдукции (Uyeda, 1982), когда континентальная плита или островная дуга набегает на океаническую литосферу, подминая ее под себя (принцип катка или ледокола). В результате этого процесса в континентальной плите снижается уровень напряжений горизонтального сжатия, а в верхней части океанской плиты сжатие вдоль нее наоборот увеличивается (рис. 9б). Поскольку уменьшение горизонтального сжатия происходит в направлении, ортогональном простиранию зоны субдукции и системе региональных разломов, то нормальное давление к магмопроводящим субвертикальным разломам уменьшается. Это уменьшение может в локальных зонах привести к тому, что горизонтальное сжатие станет меньше вертикального — литостатического давления. В этом случае возникает возможность горизонтального раскрытия субвертикальных разломов, выходящих из внутрикоровых магматических очагов, под действием давления ее магмы, что должно

приводить к активизации внутрикорового магматизма (рис. 9б).

Кроме этого явления в окружающем магматический очаг массиве также частично начинают раскрываться разрывы и трещины меньшего масштаба, обеспечивая увеличение скорости миграции флюидов. Флюиды, попадая в магматический очаг, уменьшают температуру плавления, что приводит к увеличению массы магмы и ее давления. Оба этих явления (уменьшение горизонтального сжатия и понижение температуры плавления) создают условия для активизации магматической деятельности, вулканы начинают вновь извергаться. Отметим, что наличие некоторого временного лага между сильным землетрясением и началом активного вулканизма возможно связано именно с процессами миграции флюидов, создающими условия для постепенного повышения давления в коровом магматическом очаге.

В процессе активизации вулканизма магма, поднимаясь по разлому-каналу вверх, раздвигает его стенки, создавая дополнительное горизонтальное давление на окружающие разлом породы. Дальнейшее дополнительное сжатие определяется латеральной протяженностью магмопроводящих разломов. В зонах субдукции, где такие разломы имеют протяженность в сотни километров, дополнительное горизонтальное сжатие должно распространяться вплоть до океанического желоба.

Таким образом, после ее излияния на поверхность в верхней части коры уровень горизонтального сжатия снова начинает превышать уровень

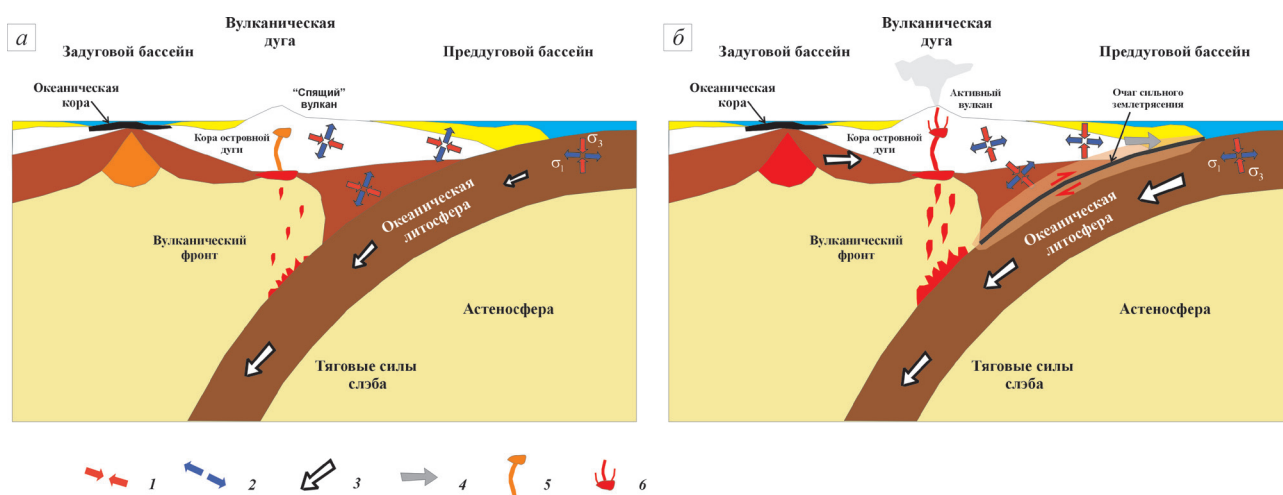


Рис. 9. Схема эволюции напряженного состояния в зонах субдукции на стадиях до сильного землетрясения (а) и после него (б): 1, 2 — напряжения наибольшего (σ_3) и наименьшего (σ_1) сжатия, 3, 4 — направления движения в слэбе и в коре до землетрясения и после него (амплитуды отражены в размерах стрелок), 5, 6 — магматические каналы на пассивной и активной стадиях магматизма (вулканизма).

Fig. 9. Scheme of the evolution of the stress state in the subduction zones at the stages before the strong earthquake (a) and after it (b): 1, 2 — stresses of the greatest (σ_3) or least (σ_1) compression, 3, 4 — directions of motion in the slab and in the crust before and after the earthquake (amplitudes are reflected in the size of the arrows), 5, 6 — magmatic channels at passive and active stages of magmatism (volcanism).

литостатического давления. В массиве снова восстанавливается режим горизонтального сжатия, существовавший до сильного землетрясения.

Иначе говоря, мы видим, что между периодами мощного вулканизма активных континентальных окраин и катастрофическими землетрясениями должна существовать прямая связь, определяемая сменой режимов напряженного состояния. При этом сильные землетрясения следует рассматривать как спусковой механизм для повышения активности корового магматизма и вулканизма, а последние явления следует рассматривать как механизм достаточно быстрого (десятки лет) восстановления режима повышенного горизонтального сжатия.

С другой стороны, в районах длительно действующего режима горизонтального растяжения или горизонтального сдвига (состояние для коры Алеутских островов согласно (Ребецкий, 2020)) активизация вулканизма повышает уровень напряжений горизонтального сжатия в направлении, ортогональном вулканической цепочке. Таким образом, создаются условия для возникновения землетрясений в виде надвигов (механизм очага землетрясения 1986/05/07, $M_s = 7.7$).

Разобрав тектонофизические основы взаимосвязи вулканизма и сильных землетрясений зон субдукции, можно вновь возвратиться к анализу состояния коры японского острова Хонсю, где после катастрофического землетрясения Тохоку на большой площади верхней части коры произошла смена геодинамического типа напряженного состояния горизонтального сжатия на режим горизонтального растяжения.

Проводимые в Японии наблюдения показывают, что за последние годы после землетрясения Тохоку имеет место возрастание вулканической деятельности: активизировались 13 из 110 вулканов. Особую обеспокоенность японцев вызывает возрастающая активность крупной вулканической кальдеры Айра и находящегося в ней вулкана Сакурадзима (остров Кюсю). За период с января по сентябрь 2015 г. этот вулкан проявлял себя более 700 раз.

ВЫВОДЫ

Для корового вулканизма оптимальным является режим напряженного состояния горизонтального растяжения и сдвига с величиной горизонтальных сжимающих напряжений, нормальных к субвертикальному магмопроводящему разрыву — каналу, меньшей уровня литостатического давления. Показано, что результатом поднятия магмы по разлому является повышение уровня этих горизонтальных напряжений до уровня давления магмы в разломе

на данной глубине. Это приводит к смене режима напряженного состояния на горизонтальный сдвиг или сжатие.

Поскольку сильнее землетрясения зон субдукции (пример землетрясения Тохоку 2011 г.) способны уменьшить уровень напряжений горизонтального сжатия до значений, меньших литостатического давления, то после таких землетрясений также может происходить смена геодинамического типа напряженного состояния. При этом длительно действовавший до землетрясения режим горизонтального сжатия сменяется режимом горизонтального растяжения или горизонтального сдвига, который благоприятствует активизации внутрикорового магматизма и вулканизму. В свою очередь явления мощного корового магматизма и вулканизма способны вернуть напряженное состояние коры зон субдукции к стандартному их режиму горизонтального сжатия. При этом время подобной реставрации напряженного состояния будет существенно меньше времени, определяемого скоростями горизонтального сокращения, обычно измеряемыми в GPS наблюдениях.

Таким образом, активизация корового магматизма, вулканизма и сильные землетрясения (серии сильных землетрясений) следует рассматривать как взаимно связанные геодинамические диполи, сосуществующие в разное время в одном пространстве.

Выполненные исследования проводились на пример зон субдукции, большая часть выводов о роли магматизма и вулканизма на повышения уровня напряжений горизонтального сжатия должна также относиться и к внутриконтинентальным орогенам таким как Кавказ, Тянь-Шань и Алтае-Саяны и областям коллизии Гималаи, Тибет.

Работа выполнена в рамках Госзаданий ФГБУН Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ФБГУН Института физики прочности и материаловедения СО РАН» и гранта РНФ 22-27-00591 МОНГ.

Список литературы [References]

- Абдурахманов А.И., Федорченко В.И. Соотношения между сейсмичностью и современным вулканизмом в пределах Курило-Камчатской островной дуги // Глубинное строение, магматизм и металлогения Тихоокеанских вулканических поясов. Владивосток. 1976. С. 143–144 [Abdurakhmanov A.I., Fedorchenko V.I. Relations between seismicity and modern volcanism within the Kuril-Kamchatka island arc // Deep structure, magmatism and metallogeny of Pacific volcanic belts. Vladivostok. 1976. P. 143–144 (in Russian)].
- Акманова Д.Р. Особенности вулканической активности окраин Тихого океана за последние 12 тыс.

- лет // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. 11-17 ноября 2007. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. С. 151–155 [Akmanova D.R. Features of volcanic activity of the outskirts of the Pacific Ocean over the past 12 thousand years // Geophysical monitoring and problems of seismic safety of the Russian Far East. Proceedings of the regional scientific and technical Conference. November 11-17, 2007. V. 2. Petropavlovsk-Kamchatsky: CF GS RAS, 2008. P. 151–155 (in Russian)].
- Акманова Д.Р., Викулин А.В., Осипова Н.А. Миграция сейсмической и вулканической активности как тектонофизический процесс // Тектонофизика и актуальные вопр. наук о Земле: материалы докл. Всерос. конф., Москва, 13–17 октября 2008 г. Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 2009. С. 265–270 [Akmanova D.R., Vikulin A.V., Osipova N.A. Migration of seismic and volcanic activity as a tectonophysical process // Tectonophysics and topical issues of Earth sciences: materials of dokl. Vseros. conf., Moscow, October 13-17, 2008, V. 2. Moscow: IFZ RAS, 2009. P. 265–270 (in Russian)].
- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. отложения и последовательность событий извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (Камчатка): отложения обломочной лавины // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 25–40 [Belousov A.B., Belousova M.G. Deposits and sequence of events of the Bezmyanny volcano eruption on March 30, 1956 (Kamchatka): debris avalanche deposits // Volcanology and seismology. 1998. № 1. P. 25–40 (in Russian)].
- Викулин А.В. Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2011. 407 с. [Vikulin A.V. Seismicity. Volcanism. Geodynamics. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamSU im. Vitus Bering, 2011. 407 p. (in Russian)].
- Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. О миграции сейсмической и вулканической активности вдоль окраины Тихого океана // Проблемы сейсmobезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007а. С. 34–35 [Vikulin A.V., Akmanova D.R., Osipova N.A. On the migration of seismic and volcanic activity along the outskirts of the Pacific Ocean. seismic safety of the Far East and Eastern Siberia. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS, 2007a. P. 34–35 (in Russian)].
- Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. Сейсмическая и вулканическая активность окраины Тихого океана // Физика геосфер: материалы 5-го Всерос. симп. Владивосток: ДальНаука, 2007б. С. 140–145 [Vikulin A.V., Akmanova D.R., Osipova N.A. Seismic and volcanic activity of the outskirts of the Pacific Ocean // Physics of geospheres: Materials of the 5th All-Russian. simp. Vladivostok: Dalnauka, 2007b. P. 140–145 (in Russian)].
- Викулин А.В., Водинчар Г.М., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений. Сборник докладов IV международной конференции. 14–17 авг. 2007 г. Паратунка, Камчатской обл. Петропавловск-Камчатский: ИКИРР ДВО РАН, 2007в. С. 275–280 [Vikulin A.V., Vodinchar G.M., Melekessev I.V., Akmanova D.R., Osipova N.A. Modeling of geodynamic processes of the outskirts of the Pacific Ocean // Solar-terrestrial communications and earthquake precursors. Collection of reports of the IV International Conference. 14-17 Aug. 2007v Paratunka, Kamchatka region. Petropavlovsk-Kamchatsky: IKIR FEB RAS, 2007c. P. 275–280 (in Russian)].
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Гусяков В.К. и др. Комплексная (катастрофические вулканические + сильнейшие сейсмические события) электронная база данных как основа для модифицированной геодинамической парадигмы (на примере Пацифики) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2009а. С. 13 [Vikulin A.V., Melekessev I.V., Gusyakov V.K. et al. Complex (catastrophic volcanic + the strongest seismic events) electronic database as a basis for a modified geodynamic paradigm (on the example of Pacifica) // Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East. Petropavlovsk-Kamchatsky: CF GS RAS, 2009a. P. 13 (in Russian)].
- Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. и др. Периодичность катастрофических извержений и их миграция вдоль окраины Тихого океана // Вестник КамчатГТУ. 2009б. № 10. С. 7–16 [Vikulin A.V., Akmanova D.R., Osipova N.A. et al. Frequency of catastrophic eruptions and their migration along the edge of the Pacific Ocean // Vestnik Kamchatka State Technical University. 2009b. № 10. P. 7–16].
- Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. и др. Повторяемость сильных землетрясений и миграция их очагов вдоль сейсмического пояса // Вестник КамчатГТУ. 2009в. № 10. С. 17–24 [Vikulin A.V., Akmanova D.R., Osipova N.A. et al. Recurrence of strong earthquakes and migration of their foci along the seismic belt // Vestnik Kamchatka State Technical University. 2009c. № 10. P. 17–24].
- Гусев А.А. Фрактальная структура последовательности вулканических извержений мира: порядковое группирование событий и эпизодичность выноса материала // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 38–60 [Gusev A.A. The fractal structure of the sequence of volcanic eruptions worldwide: order clustering of events and episodic discharge of material // Volcanology and seismology. 2014. V. 8. № 1. P. 34–53].
- Горячев А.В. Основные закономерности тектонического развития Курило-Камчатской зоны. М.: Наука, 1966. 235 с. [Goryachev A.V. The main patterns of tectonic development of the Kuril-Kamchatka zone. Moscow: Nauka, 1966. 235 p. (in Russian)].
- Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42 [Gusev A.A., Shumilina L.S. Recurrence of Kamchatka strong earthquakes on a scale of moment magnitudes // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2004. V. 3. P. 206–215].
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 2013. 416 с. [Zharkov V.N. The internal

- structure of the Earth and planets. M.: Nauka, 2013. 416 p. (in Russian)].
- Злобин Т.К., Ершов В.В., Полец А.Ю.* Строение земной коры, поле тектонических напряжений и грязевой вулканизм Сахалино-Курильского региона. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 176 с. [Zlobin T.K., Ershov V.V., Finger A.Yu. The structure of the Earth's crust, the field of tectonic stresses and mud volcanism of the Sakhalin-Kuril region. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhu, 2012. 176 p. (in Russian)].
- Крашенинников С.П.* Описание земли Камчатки: в 2 т. / С. П. Крашенинников; Рос. академия наук; Репринт. воспроизведение изд. 1755 г. СПб.: Наука; Петропавловск-Камчатский: Камшат. 1994. Т. 1. 439 с. Т. 2. 320 с. [Krashenninnikov S.P. Description of the Kamchatka land: in 2 volumes / S.P. Krashenninnikov; Russian Academy of Sciences; Reprint. reproduction of the 1755 edition of St. Petersburg: Nauka; Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamshat. 1994. V. 1. 439 p. V. 2. 320 p. (in Russian)].
- Мелекесцев И.В.* Природная катастрофа 1737–1742 гг. на Камчатке как модель будущих региональных катастроф на островных дугах Северо-Западной Пацифики // Новейший и современный вулканизм на территории России / Ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2005. С. 553–571 [Melekestsev I.V. The Natural Disaster of 1737-1742 in Kamchatka as a model of future Regional Disasters on the Island Arcs of the North-Western Pacific // The newest and modern volcanism on the territory of Russia / Ed. N.P. Laverov. M.: Nauka, 2005. P. 553–571 (in Russian)].
- Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д.* Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние десять тыс. лет // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 28–39 [Melekestsev I.V., Sulerzhitsky L.D. Volcano Ksudach (Kamchatka) for the last ten thousand years // Volcanology and seismology. 1987. № 4. P. 28–39 (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с. [Rebetsky Yu.L. Tectonic stresses and strength of mountain massifs. M.: Akademkniga, 2007. 406 p. (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю.* Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 469–506. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0137> [Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. The state of stresses of the lithosphere in Japan before the catastrophic Tohoku earthquake of 11 March 2011 // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. V 5. Iss. 2. P. 469–506 (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю.* Напряженное состояние в афтершоковой области землетрясения Тохоку 11.03.2011 // Вулканология и сейсмология. 2021. № 4. С. 22–44. <https://doi.org/10.1134/S0742046321060026> [Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. The Stresses in the Aftershock Area of the March 11, 2011 Tohoku Earthquake // Journal of Volcanology and Seismology. 2021. V. 15. № 4. P. 236–257. <https://doi.org/10.1134/S0742046321060026>].
- Ребецкий Ю.Л.* Поле глобальных коровых напряжений Земли // Геотектоника. 2020. № 6. С. 3–24. [Rebetsky Yu.L. Pattern of Global crustal stresses of the Earth // Geotectonics. 2020. V. 54. №. 6. P. 723–740. <https://doi.org/52120060114>]
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 // ДАН. 2006. Т. 407. № 1. С. 106–110 [Rebetsky Yu.L., Marinin A.V. The stress state of the Earth's crust of the western flank of the Sunda subduction zone before the Sumatra-Andaman earthquake on 12/26/2004 // Doklady Earth Sciences. 2006. V. 407. № 2. P. 321–325].
- Терком Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. М.: Мир, 1985. Т. 1. 374 с. [Donald L. Gurcotte, Gerald Schubert. Geodynamics. New York etc. 1982. 456 p.]
- Федоров П.И.* Кайнозойский вулканизм в зонах растяжения на восточной окраине Азии. М.: ГЕОС, 2006. 316 с. [Fedorov P.I. Cenozoic volcanism in stretching zones on the eastern edge of Asia. Moscow: GEOS, 2006. 316 p. (in Russian)]
- Elsasser W.M.* Convection and stress propagation in the upper mantle / Runcorn S.K. (ed) // The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors. Wiley. New York. 1969. P. 223–246.
- De la Cruz-Reyna S., Martin Del Pozzo A.L.* The 1982 eruption of El Chichón volcano, Mexico: Eyewitness of the disaster // Geofisica Internacional. 2009. V. 48. № 1. P. 21–31.
- Hildret W.* The compositionally zoned eruption of 1912 in the Valley of Ten Thousand Smokes, Katmai National Park, Alaska // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1983. V. 18. Iss. 1–4. P. 1–56.
- McCann W.R., Pérez O.J., Sykes L.R.* Yakataga Gap, Alaska: Seismic History and Earthquake Potential // Science, New Series. 1980. V. 207. № 4437. P. 1309–1314.
- MacInnes B.T., Weiss R., Bourgeois J., Pinegina T.K.* Slip Distribution of the 1952 Kamchatka Great Earthquake Based on Near-Field Tsunami Deposits and Historical Records // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V. 100. № 4. P. 1695–1709. <http://dx.doi.org/10.1785/0120090376>
- Sato M., Ishikawa T., Ujihara N. et al.* Displacement Above the Hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake // Science. 2011. V. 332. P. 1395. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1207401>
- Sauers J.* The westward migration of geophysical events in the Aleutians, Springs, 1986 // Cycles. 1986. 37. № 9. P. 203–204.
- Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., Zlobin T.K.* The state of stress in the Earth's crust along the northwestern flank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // Tectonophysics. 2016. V. 685. P. 60–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2016.07.016>
- Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E.* Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // Bulletin Society Geological France. 2013. V. 184. № 4–5. P. 335–346.
- Propagation of magma-filled cracks // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1995. V. 23. P. 287–336.*
- Uyeda S.* Subduction zones: an introduction to comparative subductology // Tectonophysics. 1982. V. 81. P. 133–159.
- Wilson J.T.* Did the Atlantic close and then re-open? // Nature. 1966. V. 211. P. 676–681.

РЕБЕЦКИЙ, СТЕФАНОВ
**ON THE MECHANISM OF INTERACTION
BETWEEN STRONG EARTHQUAKES AND VOLCANISM
IN SUBDUCTION ZONES**

Yu.L. Rebetsky¹, Yu.P. Stefanov^{2, 3}

¹*O.Yu. Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; reb@ifz.ru*

²*Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia; yu_st@mail.ru*

³*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia*

Received October 10, 2022; revised December 01, 2022; accepted December 26, 2022

The relationship between strong earthquakes and powerful volcanism in subduction zones are discussed. It is shown that abnormally strong earthquakes or a group of strong earthquakes and powerful volcanic events or volcanic activation of large areas can be considered as an interconnected geodynamic pair. At high level of horizontal compression, magma-conducting faults are clamped and volcanism in the upper part of the crust is hindered. Mega-earthquakes or a series of strong earthquakes reduce the level of horizontal compression in the crust of the island arc (continent active margin), which creates favorable conditions for the resumption of volcanic activity. For major faults located along the strike of subduction zones, upward movement of magma during volcanic eruptions or intracrustal magmatism leads to an increase in horizontal compression stresses in the surrounding rocks to the pressure level of rising magma. As a result, a horizontal compression stress state is restored in the crust and, thus, the cycle is closed. Once again, a state emerges in which earthquakes are an effective mechanism for reducing stresses.

Keywords: stresses, volcanism, earthquakes, compression, tension, faults, magma.