

УДК 550.341

О ЧЕРЕДОВАНИИ КОРОВОЙ И МАНТИЙНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Каримов Ф.Х.

*Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии
АН Республики Таджикистан, г. Душанбе, seismtadj@rambler.ru*

Введение

Чередование коровых и мантийных землетрясений в регионе Центральной Азии (ЦА), куда входят крупнейшие горные системы – Гиндукуш, Гималаи, Куэньлунь, Памир, Каракорум, Хиндурадж, Тянь-Шань – и долинные территории – Афгано-Таджикская депрессия, Алайская долина, равнинные зоны Туранской и Таримской плит, свидетельствует о попеременном накоплении и разряде сейсмической энергии в земных недрах: в течение серии землетрясений с глубокофокусными и промежуточными очагами «работает» мантия, слои пониженных вязкостей, а затем, в течение коровой серии, – земная кора [10,11,16,19,21]. В некоторые интервалы времени чередование нарушается – коровые и мантийные землетрясения следуют вперемешку. В настоящей работе рассматривается физическая модель для возможного объяснения чередования коровых и мантийных землетрясений Памиро-Гиндукушской и Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивных зон и причин его нарушения.

Модель чередования коровых и мантийных землетрясений

Согласно представлениям современной глобальной тектоники под действием сил спрединга Индо-Австралийская плита сталкивается с Евразийской, сжимая земную кору и литосферу в целом, что проявляется в подъёме горных систем Центральной Азии и их утолщении, и субдуцируя под последнюю [1,5,7,9,14,20]. При этом Индо-Австралийская плита перемещается, преодолевая силы сопротивления со стороны земной коры и верхней мантии Евразийской плиты, а также архимедовых сил при вхождении в астеносферу. Пусть на некоторой стадии сопротивление Евразийской литосферы мало и она относительно свободно пропускает субдуцирующую литосферу глубже в верхнюю мантию. Проникновение плиты в эти более глубокие слои, температура которых увеличивается с глубиной и составляет 300-1000⁰С на глубинах от 10 км по порядку величины до 100 км, повышенное выделение тепла из-за трения при относительно большой скорости субдукции, высокие давления способствуют фазовым превращениям [1,3,8,22] и образованию резервуара с расплавленной фракцией, гидро- и газофлюидами около субдуцирующей плиты, подобно образованию вулканических камер на глубинах от первых км до десятков км. Из-за температурной инерции к нагреву и повышенной скорости субдукции, когда вязкая при малых скоростях среда ведёт себя как твёрдая [4,7,15,20], в нижней части плиты могут происходить зацепы, например, с образованиями «консолидированного включения» [6], и скалывания массива земных недр с подвижками мантийных землетрясений.

Свидетельства о существенных неоднородностях состава земной коры и верхней мантии, в т.ч., возможно, о флюидных резервуарах, получены по данным электрической томографии Гиссаро-Алая и Памира, показавшей различия в локальных удельных электрических сопротивлениях в широких пределах – от 1 до 1000 Ом·м [13].

По мере развития субдукции и процесса плавления пород литосферы давление в резервуаре увеличивается, и он расширяется, например, как это происходит при подготовке вулканических извержений и проявляется в виде предшествующих извержениям подъёмов и опусканий земной коры после них [19]. Давления в вулканических резервуарах составляют около 1 – 10 МПа по порядку величины [8], что сопоставимо с геостатическими давлениями на глубинах в первые км, градиент которых составляет 23 МПа/км [7, 8]. Рост давления в камере и расширение резервуара приводит к придавливанию погружающейся плиты к вмещающей и, тем самым, к увеличению трения между ними: подобное заклинивание замедляет погружение плиты и тем самым субдукцию, активность мантийной сейсмичности снижается.

Расширение резервуара приводит также к тому, что на кору начинают действовать силы, вертикально направленные снизу вверх (см. в следующем разделе настоящей статьи), Касательные напряжения, действующие в разломной зоне, растут и начинает «работать» коровая сейсмичность. Через разломные зоны происходит выход флюидов с дегидратацией и дегазацией резервуара, давление в резервуаре падает, сопротивление субдукции ослабевает и опять начинает расти её скорость с

активизацией глубинной сейсмичности – чередование коровой и глубинной сейсмической активности продолжается.

Подъём гипоцентров очагов форшоков с глубин около 100 – 200 км вверх до глубин 10 км в зоне подготовки Мургабского-Сарезского землетрясения 7.12.2015 г. с $M = 7.2$ на Памире, в Таджикистане, и обратное последовательное опускание очагов афтершоков [11] свидетельствует в пользу действия такого механизма миграции флюидов.

Вертикально действующие силы и модель очага землетрясения

Рассмотрим роль «вертикальных сил», действующих на горизонтальный слой земной коры, через который проходит плоскость разлома. Пусть на горизонтальный слой действует снизу вверх вертикально направленная сила f со стороны магматического резервуара, образовавшегося в результате плавления пород литосферы, которые опустились в нижние слои земной коры на глубины 100 км, расплавились из-за существующих высоких температур недр и трения, вызванного подготовкой мантийного землетрясения (рис.). Под действием этой силы произойдёт изгиб земной коры, направленный выпуклостью вверх, и результирующая горизонтально действующих сил бокового сжатия F и $-F$, которые обусловлены действием гравитации, будет по модулю равна

$$F_f = \sqrt{F^2 + f^2}. \quad (1)$$

Нормальная компонента этой силы (1), действующей в положительном направлении, N_1 , будет равна

$$N_1 = F_f \cos(\alpha + \beta), \quad (2)$$

её проекция на плоскость разлома –

$$F_{r1} = F_f \sin(\alpha + \beta), \quad (3)$$

и, как следует из (2) и (3), условие равновесия примет вид:

$$k_1 = \operatorname{tg}(\alpha + \beta), \quad (4)$$

где k_1 – коэффициент трения покоя левого крыла разломной зоны, α – падения плоскости разлома, равный углу между горизонталью и нормалью к плоскости разлома (рис.), β – угол, образуемый результирующей силой F_{r1} с горизонталью.

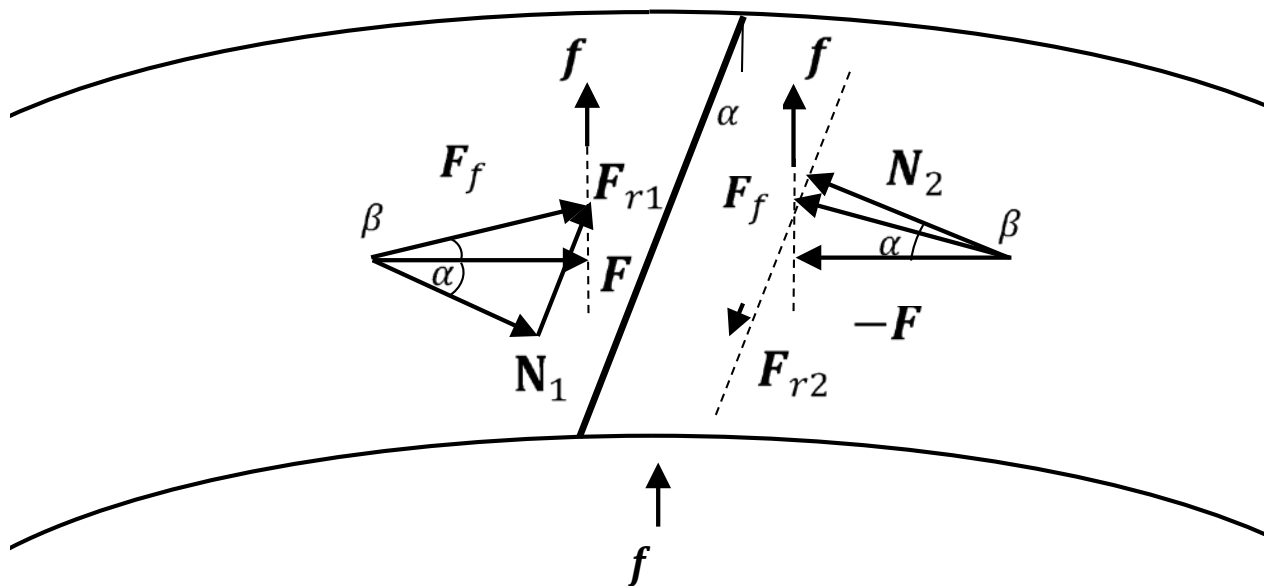


Рис. 1. Схема действующих сил в разломной зоне и изгиб слоёв.

Нормальная компонента этой силы, действующей в отрицательном направлении, N_2 , будет равна

$$N_2 = F_f \cos(\alpha - \beta), \quad (5)$$

а её проекция на плоскость разлома –

$$F_{r2} = F_f \sin(\alpha - \beta), \quad (6)$$

и, как следует из (5) и (6) условие равновесия примет вид:

$$k_2 = \operatorname{tg}(\alpha - \beta), \quad (7)$$

где k_2 – коэффициент трения покоя правого крыла разломной зоны.

Из сравнения величин коэффициентов трения видно, что

$$k_1 > k_2,$$

т.е. тангенциальные напряжения, действующие в левом крыле разлома, больше действующих в правом (рис.). Это означает, что в результате действия «изгибающих» сил снизу правое крыло заклинивается, а левое, наоборот, расклинивается, разгружается к потенциальному скольжению по разломной плоскости.

Проекции результирующих сил F_{r1} (3), и F_{r2} (6) на плоскость разлома зависят от величины «вертикальной» силы f в соответствии с (1). При этом очевидно, угол α остаётся неизменным, а угол β зависит от f :

$$\sin \beta = f / \sqrt{F^2 + f^2}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что с ростом силы f растёт β , а значит, наступает момент, когда величина сила трения покоя в левом крыле может достичь силы трения скольжения и произойдёт подвижка по разломной плоскости типа взброса левого крыла.

В частности, при $\alpha = \beta$ проекция результирующей силы на плоскость разлома F_{r2} (6) обращается в нуль, а соответствующая нормальная компонента становится максимально возможной: $N_2 = F_f$ (2), коэффициент трения покоя k_2 (7) обращается в нуль. Проекция же результирующей силы F_{r1} (3) на плоскость разлома будет равной $F_f \sin 2\alpha$ и $N_1 = F_f \cos 2\alpha$ (2), $k_1 = 2 \tan \alpha$ (4). Такая ситуация способствует стабилизации правого крыла разлома и нарушению равновесия для левого – если с ростом f проекция F_f (1) на плоскость разлома станет достаточной для преодоления силы трения скольжения, т.е. коэффициент трения покоя k_1 достигнет значения трения скольжения k , то произойдёт подвижка левого крыла разломной зоны. Например, если для угла падения плоскости разлома Мургабского землетрясения принять значение 60° , т.е. $\alpha = 30^\circ$, а для сил $F = 50$ МПа, $f = 30$ МПа, то проекция F_{r1} , как это вытекает из (3), будет равна 50.5 МПа – проекция F_{r1} увеличилась по сравнению с состоянием, когда вертикальной силы нет, в 2 раза. Если $f = 50$ МПа при всех других предыдущих равных условиях, то $F_{r1} = 61.8$ МПа – увеличение уже почти в 2.5 раза. Полученные оценки находятся в пределах критических значений избыточных сил, вызывающих подвижки землетрясений, которые по оценкам составляют 0.1 МПа – 10 МПа по порядку величины [6,7, 20].

При действии вертикально направленных вверх сил происходит изгиб первоначально плоскопараллельной почти горизонтальной части земной коры, аналогично деформации изгиба балки (рис.). И верхняя и нижняя половины слоя расширяются, причём верхняя половина балки растягивается больше, чем нижняя [12]. Т.к. горные породы, как и твёрдые тела вообще, намного менее прочны к растяжению, чем к сжатию, например, для амфиболита, известняка, песчаников, некоторых сланцев отношение критических напряжений составляет 1-2 порядка величин [18], то при действии вертикальных сил верхняя поверхностная часть коры подвержена большим разрушениям, чем нижняя. Такой расклинивающий эффект «вертикальных» сил в силу своих свойств приводит к увеличению пористости и трещиноватости верхних, поверхностных слоёв земной коры. Это, во-1-х, ослабляет земную кору в разломной зоне, и, во-вторых, создаёт условия для инфильтрации атмосферных вод и воды земной коры, способствуя, например, проявлению эффекта Ребиндера. В результате уменьшаются трение и сцепления пород в разломной зоне и, тем самым, увеличивается вероятность возникновения подвижки землетрясения или крипа: включается положительная обратная связь – приращение напряжений и расклинивание приводит к снижению прочности разломной зоны, снижение же прочности, в свою очередь, приводит к росту расклинивания.

Представленные расчёты для действия вертикальных сил в условиях сильного горизонтального сжатия литосферы показывают, что этот механизм весьма эффективен не только для создания критических напряжений для подвижек землетрясений, но и для процессов складкообразования, образования разломов земной коры, а также для раскалывания литосферных плит и поддержания регулярной динамики спрединга.

Заключение

Представленная модель даёт возможность сделать следующие предположения:

– Проникновение плиты в более глубокие слои оболочек Земли способствуют образованию резервуара с расплавленной фракцией и гидро- и газофлюидами у верхней части субдуцирующей плиты, подобно образованию вулканических камер на глубинах порядка 1 – 10 км.

– В нижней части субдуцирующей плиты могут происходить скалывания массива земных недр с подвижками мантийных землетрясений.

– По мере развития субдукции резервуар растёт, давление в нём увеличивается, и с некоторого момента оно настолько прижимает субдуцирующую плиту к вмещающей плите, что из-за увеличения трения между ними субдукция замедляется и глубинная сейсмичность ослабевает. Расширение резервуара приводит к росту вертикально направленных снизу вверх, касательные напряжения в разломной зоне растут и начинает «работать» коровая сейсмичность.

– Через разломные зоны происходит выход флюидов с дегидратацией и дегазацией резервуара, давление в резервуаре падает, сопротивление субдукции ослабевает и опять начинает расти её скорость с активизацией глубинной сейсмичности – чередование коровой и глубинной сейсмической активности продолжается.

Список литературы

1. Айзекс Б., Оливер Дж., Сайкс Л. Сейсмология и новая глобальная тектоника // Новая глобальная тектоника. Пер. с англ. М.: «Мир», 1974. С. 38–57.
2. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Пер. с англ. М.: «Мир», 1983. Т.1. 883 с., Т.2. 880 с.
3. Артюшков Е.В. Новейшие поднятия земной коры как следствие инфильтрации в литосферу мантийных флюидов // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 6. С. 738–760.
4. Белоусов В.В. Основные вопросы тектоники. М.: ГНТИ, 1954. 607 с.
5. Буртман В.С. Геодинамика Памир-Пенджабского синтаксиса // Геотектоника, 2013. № 1. С. 36–58.
6. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: «Наука», 1991. 219 с.
7. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: «Наука», 1983. 416 с.
8. Калинин В.А., Томашевская И.С. Фазовые переходы и землетрясения // Прогноз землетрясений Гл. ред. М.А. Садовский. Душанбе-Москва: «Дониш», 1983–1984. №4. С. 151–158.
9. Каримов Ф.Х. О проявлениях тектоники плит на территории Таджикистана: аналитический обзор // Геологическая корреляция и геодинамика складчатых областей. Душанбе: «Дониш», 2015. С. 89–104.
10. Каток А.П. О взаимосвязи коровых и верхнемантийных землетрясений юга Средней Азии // Физика Земли. 1991. № 12. С. 3–11.
11. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в областях Сарезского и Нурекского водохранилищ (Таджикистан): адаптация литосферы к дополнительной нагрузке // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15. № 4. С. 64–76.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: «Наука», 1987. 248 с.
13. Леонов М.Г., Рыбин А.К., Матюков В.Е., Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г. Гиссаро-Алай и Памир: сравнительная геодинамика и взаимоотношение // Материалы 4-ой тектонофизической конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». Москва: ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта, 2016. С. 129–138.
14. Лукк А.А., Юнга С.Л. Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. Душанбе: «Дониш», 1988. 234 с.
15. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: «Недра», 1965 (переиздание – М.: «Наука», 2006). 379 с.
16. Негматуллаев С.Х., Джураев Р.У., Улубиева Т.Р. Проявления сильных землетрясений на территории Таджикистана в 2015 году // Изв. АН РТ. 2016. №4(165). С. 84–94.
17. Никонов А.А. Современные движения земной коры. М.: «Наука», 1979. 184 с.
18. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М.: «Недра», 1967. 288 с.
19. Саломов Н.Г., Каримов Ф.Х. О последовательности землетрясений Памиро-Гиндукуша, Таджикской Депрессии и Тянь-Шаня // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы VII Международной сейсмологической школы. Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ГС РАН. 2012. С. 262–266.
20. Шейдеггер А.Е. Основы геодинамики. Пер. с англ. М.: «Недра», 1987. 384 с.
21. Mogi K. Relationship between shallow and deep seismicity in Western Pacific region // Tectonophysics. 1973. V. 17 (1-2). P. 1–22.
22. Naif S., Key K., Constable S., Evans R.L. Melt-rich channel observed at the lithosphere-asthenosphere boundary. Nature. 2013. V. 495. P. 356–359.