УДК 550.34

ОТРАЖЕНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2017-2019 гг. ЗАПАДНОГО СЕГМЕНТА АЛЕУТСКО – КОМАНДОРСКОГО БЛОКА В ПОЛЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА V_P/V_s

Славина Л.Б., Кучай М.С.

Институт Физики Земли РАН, slavina@ifz.ru

Введение

Исследовано отражение в поле кинематического параметра *Vp/Vs* .динамики развития афтершокового процесса сильных землетрясений, произошедших в районе западного сегмента Алеутско-Командорского блока в 2017 – 2019 гг. Использованы данные системы сейсмических наблюдений в реальном времени Камчатского филиала Федерального Исследовательского Центра Единой Геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН, агентство KAGSR)[4].

Слежение за временами пробега P- и S- волн, регистрируемых на станциях, и отношением скоростей этих волн - параметром V_p/V - позволяет получить информацию о состоянии и динамике геологической среды. Под воздействием напряжений происходят слабые землетрясения. «Растрескивание» среды сопровождается дилатансионным расширением и уменьшением отношения V_p/V s. При сжатии (закрытии трещин) отношение V_p/V_s увеличивается [1, 2].

Методика расчета параметра Vp/Vs

Методика расчета параметра см. напр. [7] сводится к следующему: по формуле

$$V_{\rm P}/V_{\rm S} = T_{\rm S-P}/(T_{\rm P} - T_0) + 1, \tag{1}$$

где $T_{\text{S-P}}$ - разность времен вступлений *P*- и *S*-волн на конкретной станции от *i*-ого землетрясения, $T_{\text{p}} - T_0$ – время пробега *P*-волны, рассчитываются единичные значения параметра рассчитываются. Затем для каждого события проводилось осреднение по группе станций, и полученное значение приписывалось положению гипоцентра. Значения равные 1.73 ± 0.05 считались нормальными для исследуемой геологической среды, значения $V_{\text{P}}/V_{\text{S}} < 1.68$ – считались пониженными, характеризующими процесс растяжения. Значения $V_{\text{P}}/V_{\text{S}} > 1.78$ – считались повышенными, характеризующими процесс сжатия. Затем строились карты размещения афтершоков по площади во времени и глубине, вертикальные разрезы в плоскости *XZ*,с окраской в соответствии с параметром $V_{\text{p}}/V_{\text{s}}$.

Описание района и проведенных исследований

Исследовано отражение в поле кинематического параметра *Vp/Vs* .динамики развития афтершокового процесса сильных землетрясений, произошедших в районе западного сегмента Алеутско – Командорского блока в 2017 – 2019 гг

Рассматривалось поведение параметра V_p/V_s в западном сегменте Алеутско-Командорского блока, в области сочленения его с Тихоокеанской плитой и Камчаткой в период возникновения сильных землетрясений 2017 – 2019 гг. В этом сегменте возникла серия сильных землетрясений, «оконтуривающих» Командорский блок, сопровождавшихся афтершоками.(Рис.1)

Северо-восточнее о. Медного, на трансформном разломе Беринга 17.07.2017 г произошло сильнейшее из этой серии событий землетрясение с $M_w = 7.8$, названное Ближне-Алеутским [8, 9, 10]. Оно предварялось более слабым землетрясением в районе Ближних Алеутских островов 02.06.2017г. с $M_w = 6.8$. Далее активизация продолжилась на С-3, вдоль разлома Беринг, где 25.01.2018 г. произошло следующее сильное событие с $M_w = 6.2$. В районе сочленения Курило - Камчатского и Алеутского желобов, на Тихоокеанской плите, на структуре, ассоциируемой с Угловым поднятием (по Селиверстову Н.И. [6]), 20.12.2018 г. произошло следующее сильное событие с $M_w = 7.3$. Далее, как бы завершая контур активизации вокруг Командорского блока, в Камчатском проливе 25 и 26.06.2019г произошли последовательно два сильных землетрясения с $M_w = 6.4$ и 6.3 соответственно. Землетрясения сопровождались афтершоками. Афтершоки землетрясений «Углового», «Камчатского пролива» продолжаются до сего времени.



Рис. 1. Карта размещения сильных землетрясений 2017 - 2019 гг. и их афтершоков, с окраской по параметру V_p/V_s . Звездами показаны главные события по данным NEIC (синие) [11], KAGSR (красные) [4] и механизмы очагов по данным NEIC.

Положение главных толчков землетрясений, механизмов по данным NEIC, афтершоков с окраской в соответствии со значениями параметра V_p/V_s показано на Рис. 1.

Особенности возникновения во времени и распределения по площади афтершоков указанных выше землетрясений и отражение в поле параметра V_p/V_s показаны на приведенных ниже рисунках. Представлены карты размещения афтершоков по площади с окраской (1) в соответстви со временем возникновения в следующих интервалах: первые сутки, 3-суток, 7 дней и 1 месяц после главного толчка; (2) с окраской в соответствии со значениями параметра V_p/V_s , как это показано на рис 2. Построены разрезы по профилям, линии профилей показаны на Рис. 1. Результаты построений последовательно по времени возникновения указанных выше землетрясений приведены ниже.

Карты и разрезы землетрясения 02.06.2017 г. и афтершоков в районе Ближних Алеутских островов представлены на Рис. 2.

Следует отметить, что это событие произошло достаточно далеко от сети КФ. Тем не менее, можно видеть, что в первые несколько суток после главного толчка афтершоки возникали в направлении вкрест разлома Беринг. В последующий временной интервал (месяц), можно отметить их распространение вдоль разлома Беринг, причем, в направлении на юго-восток. Окраска показывает, что на CB от разлома располагаются пониженные, а на ЮЗ нормальные и повышенные значения параметра V_p/V_s . Значения V_p/V_s у афтершоков возникших в интервале до месяца после главного события вдоль разлома также пониженные.

Рассмотрим построенные по такой же схеме карты и разрезы афтершоков Ближне -Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. (Рис. 3).

Механизм очага землетрясения – сдвиг (Рис. 1). В первые сутки афтершоки возникли по направлению вкрест разлома Беринг, на плоскости, совпадающей с одной из нодальных плоскостей механизма очага главного события. В последующие периоды: 3, суток, 8 суток, месяц с момента главного события афтершоки распространялись вдоль разлома Беринг, в основном в ЮВ направлении, но также и в направлении СЗ, в направлении о. Беринг. По параметру V_p/V_s видим пониженные значения к СВ от разлома и повышенные – к ЮЗ. На разрезах хорошо видна плоскость падения разлома на ЮВ, под Командорскую котловину, до глубин ~40км. (Рис. 3).



Рис. 2. Карты и разрезы размещения афтершоков землетрясения 02.06.2017 г. по времени и с окраской по Vp/Vs.



Рис. 3. Карты и разрезы размещения афтершоков землетрясения 17.07.2017 г. с окраской по V_p/V_s (a); б) в интервалы времени, указанные в условных обозначениях. Условные обозначения см. Рис. 2.

25.01.2018 г. в районе западного окончания о-ва Беринг произошло землетрясение с $M_w = 6.2$ также сопровождавшееся афтершоками. На Рис 1. можно видеть характерное размещение параметра V_p/V_s – на СВ, при погружении Командорского блока под Командорскую котловину, пониженные значения, на Командорском блоке, на Беринговоморском склоне о-ва Беринг – повышенные.

Сильное землетрясение 20.12.2018 г. произошло в области погружения Тихоокеанской плиты под островодужные системы Алеутскую и Курило-Камчатскую. В пределах региона исследования находится крайний северо-западный участок Тихоокеанской плиты, ограниченный с севера и северозапада сочленяющимися глубоководными желобами Курило-Камчатским и Алеутским [3]. К зоне сочленения желобов прилегает своим северным окончанием одна из крупнейших морфоструктур Тихого океана – Гавайско-Императорский хребет. На акваториях Камчатско-Командорского региона расположены два крайних звена этого хребта – возв. Детройт и возв. Обручева. На участке Тихоокеанской плиты, прилегающем к западному окончанию Алеутского желоба, отсутствуют морфологические признаки краевого океанического вала. Переход к океаническому борту желоба фиксируется разрозненной цепочкой небольших поднятий, наиболее крупные из которых расположены на флангах рассматриваемого участка: напротив банки Стелмейт (поднятие Бартлетт) и непосредственно в районе сочленения желобов – поднятие Угловое, к которому, как полагают в КФ ГС, приурочено землетрясение 20.12.2018.(Рис. 4).

При рассмотрении афтершокового процесса землетрясения 20.12.2018 следует учитывать сейсмотектонические особенности, отмеченные Н. И. Селиверстовым и отмеченные нами выше. В первые несколько суток афтершоковый процесс развивался по структурам, простирающимся в направлении ЮЗ–СВ, т. е. в «Камчатском» направлении, соответствующем простиранию Камчатской сейсмоактивной зоны. Затем начали прорабатываться структуры «Алеутского» направления (ЮВ–СЗ). Сильнейший афтершок, 24.12.2018, $M_w = 6.1$ произошел на разломе, который мы относим к Алеутскому направлению. В дальнейшем афтершоки происходили по обеим разрывным структурам. Наблюдается расширение площади афтершокового облака и продвижение его в СЗ направлении, в зону Камчатского пролива и Командорского блока.



Рис. 4. Карты и разрезы размещения афтершоков землетрясения 20.12.2018 г. «Угловое» в интервалы времени, указанные в условных обозначениях (а); б) с окраской по V_p/V_s . Условные обозначения см. Рис. 2.

Параметр V_p / V_s весь период развития афтершокового процесса имеет пониженные значения (< 1.68), свидетельствующий о преобладании растяжения, дилатансии в развитии процесса сброса напряжений. Механизмы главного толчка и сильного афтершока – сброс (Рис. 1).

В Камчатском проливе 25.06.2019 в . 9 час 5 мин 40 UTC произошло землетрясение с $M_w = 6.4$, а 26.06. 2019 г в 02 час 18.мин. 07 с. - следующее сильное землетрясения с $M_w = 6.3$. Землетрясения различны по своей природе. Первое – механизм очага - сдвиг - произошло на продолжении разлома Беринг. Его афтершоки в первые сутки происходили вкрест разлома. Второе сильное землетрясение имеет, вероятно, коллизионную природу, на что указывают и механизм этого события - взброс (см. Рис. 1). Природа этих землетрясений непосредственно связана с особенностями сейсмотектоники этого района.

Котловина Камчатского пролива является районом сочленения структур Алеутского хребта с континентальным склоном Восточной Камчатки. Отроги Командорско-Алеутского хребта здесь погружаются в СЗ направлении под поверхность аккумулятивной равнины, однако в рельефе фундамента и структуре осадочного чехла непрерывно прослеживаются до подводного склона п-ова Камчатский, где сочленяются с континентальным склоном восточной Камчатки в районе мыса Африка [6].

В развитии афтершокового процесса так же выделяются два направления: на продолжении разлома Беринг, СЗ-ЮВ и поперечное, «Камчатского» направления, с СВ на ЮЗ. Расположение афтершоков первых суток – вкрест разлома Беринг – по-видимому, соответствует плоскости сдвиговой подвижки в очаге землетрясения. Значения V_p/V_s пониженные. При перемещении афтершоков в направлении на ЮЗ появляются повышенные значения. Второе сильное землетрясение - по механизму очага взброс - характерно для зон тектонической коллизии. На разрезах афтершоки обоих образуют две группы - на глубине 5 – 25км и на глубине 50 км. Значения по V_p/V_s пониженные на СВ участке и повышенные на ЮЗ участке. Область градиента может быть вероятным местом возникновения сильного афтершока. Наблюдается процесс развития афтершоков в ЮЗ направлении.



Рис. 5. Карты и разрезы по линии IJ афтершоков землетрясений 25.06 и 26.06.2019 в Камчатском проливе с окраской по *Vp/Vs* и в интервалы времени. Условные обозначения см. Рис. 2.

Результаты анализа поля V_p/V_s

Приведенные выше результаты анализа поля V_p/V_s исследуемого сегмента Алеутско-Командорского блока, приводят нас к выводу о том, что кинематический параметр V_p/V_s характеризует упругие и прочностные особенности геофизической среды, отражает характер поля напряжений и его изменения в афтершоковом процессе и может служить маркером состояния среды.

Распределение повышенных и пониженных значений параметра V_p/V_s вдоль разлома Беринг, в афтершоковые периоды рассмотренных сильных землетрясения 2017 – 2018 гг., свидетельствует об устойчивом процессе дилатансионного растяжения, как в очаговых зонах, так и вдоль всего разлома в целом. При переходе в области сейсмотектонической коллизии или субдукции наблюдаются области концентрации повышенных и пониженных значений параметра, которые связываются нами с областями сжатия (компакции) и растяжения (дилатансии) согласно Николаевскому В.Н.[5].

Заключение

Исследования параметра V_p/V_s показали возможность оценки строения и напряженного состояния сейсмотектонических структур по характеру распределения параметра V_p/V_s , его информативность в выявлении особенностей строения геолого-геофизической среды, ее напряженного состояния.

Список литературы

1. Гарагаш И. А. О хрупком разрушении упругих тел с большим числом трещин. В кн.: Механика тектонических процессов. Алма-Ата: Наука, 1983. С. 61–74.

2. Гарагаш И. А., Хайдаров М. С. Модель развития сейсмического процесса в зоне тектонического разлома перед сильным землетрясением // Сейсмологические исследования. 1989. № 11. С. 88–97.

3. Гордеев Е. И., Пинегина Т. К., Ландер А. В., Кожурин А. И. Берингия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // Физика Земли. 2015. № 4. С. 58-67.

4. Каталог землетрясений. 1999–2019 гг. Отв. исп. С.Л. Сенюков. Режим доступа: http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm

5. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика // М. Недра, 1996. 447 с.

6. Селиверстов Н. И. Геодинамика зоны сочленения Курило- Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Кам ГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.

7. Славина Л.Б., Мячкин В.В. Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки). // Геофизические исследования. 2005. № 3. С. 24–37.

8. Чебров В. Н., Дрознин Д. В., Кугаенко Ю. А., Левина В. И., Сенюков С. Л., Сергеев В. А., Шевченко Ю. В., Ящук В. В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 18–40.

9. Чебров Д. В., Кугаенко Ю. А., Абубакиров И. Р., Ландер А. В., Павлов В. М., Салтыков В. А., Титков Н. Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с М_W = 7.8 на границе Командорской сейсмической бреши // Вестник КРАУНЦ. 2017. № 3. Вып. 35. С. 22–25.

10. Чебров Д. В., Д. В., Кугаенко Ю. А., Ландер А. В, Абубакиров И. Р.,Гусев А.А., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Титков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с М_W = 7.8. Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке. //Физика Земли. 2019. №4. С. 48–71.

11. National Earthquake Information Center. Earthquake Catalog https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/.