

УДК 550.343.6

ДЕФИЦИТ СИЛЬНЫХ АФТЕРШОКОВ КАК ИНДИКАТОР ПОСТСЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ В ОЧАГАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗОН СУБДУКЦИИ

© 2021 г. Член-корреспондент РАН П. Н. Шебалин¹, И. А. Воробьева^{1,*},
С. В. Баранов^{1,2}, член-корреспондент РАН В. О. Михайлов^{3,4}

Поступило 04.12.2020 г.
После доработки 21.01.2021 г.
Принято к публикации 22.01.2021 г.

Демонстрируется относительное снижение доли сильных афтершоков в первые дни после землетрясений в зонах субдукции и показана связь этого явления с асейсмичным сбросом напряжений.

Ключевые слова: зоны субдукции, сильные землетрясения, постсейсмические деформации, афтерслип, афтершоки

DOI: 10.31857/S2686739721050170

Известно, что землетрясения сопровождаются постсейсмическими процессами, которые начинаются сразу после основного толчка и проявляются в афтершоках и асейсмических деформациях [1, 2]. Если косейсмическая подвижка происходит практически мгновенно, то постсейсмические движения, обусловленные релаксационными процессами, могут продолжаться годы и охватывать территории в тысячи километров после сильнейших землетрясений. Связанные с этими процессами смещения наблюдаются на земной поверхности и могут быть измерены методами наземной и спутниковой геодезии. Главными движущими механизмами постсейсмической деформации являются вязкоупругая релаксация напряжений в коре и верхней мантии Земли и постсейсмическое проскальзывание (афтерслип), отражающее фрикционные свойства контакта тектонических плит в очаговой зоне сильного землетрясения. Афтерслип может проявляться в виде

афтершоков и/или медленного асейсмического проскальзывания (крипа) [3, 4].

Постсейсмические движения тесно связаны с афтершоковыми процессами [1], в частности, скорость деформаций затухает гиперболически как $1/t$ и может быть, как и частота афтершоков, аппроксимирована законом Омори [5]. При этом рядом исследователей было показано, что афтершоки ответственны за очень малую часть постсейсмических деформаций, не более нескольких процентов [6].

В настоящее время роль афтерслипа и вязкоупругой релаксации в постсейсмических деформациях является предметом интенсивного изучения, однако, несмотря на ряд выполненных исследований [1, 2, 7–9], окончательной теории здесь пока не выработано. Особый интерес представляет период непосредственно после основного толчка, так как данные GPS часто фиксируются один раз в сутки, что недостаточно для надежной регистрации движений земной поверхности и разделения косейсмического и постсейсмического смещения [10].

В настоящей работе мы используем анализ магнитудно-частотных распределений афтершоков во времени. В ряде работ [11, 12] была доказана связь формы графиков повторяемости с типом деформаций и сейсмическим сцеплением, в частности, показано, что значительное асейсмическое проскальзывание (крип) вызывает дефицит сильных событий и приводит к загибу графика повторяемости. На примере трех сильных землетрясений в зонах субдукции мы покажем, что имеется дефицит сильных афтершоков в области

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

² Кольский филиал Федерального Исследовательского Центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, Апатиты, Россия

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: vorobiev@mitp.ru

погружающейся плиты (в слабе) в начальной постсейсмической стадии, что свидетельствует о значительном афтерслипе. В этом контексте афтерслип подобен крипу, представляющему собой асейсмическое движение вдоль разлома, с той лишь разницей, что постсейсмическое скольжение возникает в результате землетрясения.

Мы анализируем афтершоки Кроноцкого землетрясения на Камчатке, 1997 г., $M_w7.8$; Симуширского землетрясения на Курильских островах, 2006 г., $M_w8.3$ и землетрясения Тохоку в Японии, 2011 г., $M_w9.0$. Афтершоки в слабе из каталога ANSS с $M \geq 4.7$ показаны на рис. 1а–с. События, произошедшие на Тихоокеанской плите восточнее глубоководных желобов (включая второе Симуширское землетрясение 11.01.2007 $M_w8.1$), а также поверхностные события материковой Японии удалены. Длительность афтершоковой последовательности определяется по выходу сейсмичности на фоновый уровень. В районе Тохоку до сих пор наблюдается повышенный уровень сейсмической активности, поэтому для него исследуем интервал времени в 3000 дней; после Симуширского землетрясения – в 1000 дней. После Кроноцкого землетрясения активность падает до уровня фона в течение месяца, и мы исследуем 30 дней.

Рост магнитуды афтершоков и числа сильных событий во времени наблюдается для всех трех землетрясений (рис. 1 а–с). Графики повторяемости ранних афтершоков также показывают недостаток сильных событий по сравнению с поздними афтершоками, что проявляется в большем наклоне, наблюдаемом для сильных ранних афтершоков (рис. 1 а–с). Таким образом, распределение ранних афтершоков по магнитуде имеет черты, характерные для зон со значительным асейсмическим проскальзыванием. Недостаток сильных событий проявляется в различные временные отрезки, примерно 10 дней после землетрясений Тохоку и Симуширского, и 0.3 дня после Кроноцкого. Загиб графика повторяемости также происходит на различной магнитуде: около $M6$ после Тохоку, $M5.5$ после Симуширского и $M5$ после Кроноцкого. Различие может объясняться особенностями строения зоны субдукции в очаговых зонах исследуемых землетрясений.

Значительные асейсмические смещения были зафиксированы для всех трех исследуемых землетрясений [6, 9, 13, 14], однако вклад афтерслипа и вязкоупругой релаксации все еще остается предметом дискуссии. В случае Симуширского землетрясения модель вязкоупругой релаксации с аномально низкой вязкостью астеносферы 2×10^{17} Па с объясняет наблюдаемые смещения, но в отличие от модели афтерслипа не согласуется с постсейсмическими изменениями гравитационного поля по моделям спутников GRACE [13]. Анализ пост-

сейсмических деформаций землетрясения Тохоку показывает, что в начальной стадии процесса основной вклад дает афтерслип, а вязкоупругая релаксация играет второстепенную роль [9, 14].

Лей и Канамори и соавт. [15] предложили модель гетерогенного межплитового сцепления на запертых участках зон субдукции (рис. 2). Были выделены обширные области сильного сцепления, так называемые аспериты, в которых происходят большие косейсмические подвижки; зоны стабильного асейсмического слипа (зоны низкого сцепления); а также зоны условно-стабильного проскальзывания (небольшие изолированные аспериты), которые проявляют сейсмическую активность преимущественно после значительных сейсмических смещений в прилежащих зонах сильного сцепления (афтершоки). В межсейсмический период в таких областях могут наблюдаться повторяющиеся землетрясения (repeating earthquakes). Эффективность модели гетерогенного сцепления в зонах субдукции [15] была показана при изучении постсейсмических деформаций сильнейших землетрясений Тохоку, Япония, $M_w9.0$ [14, 16], и Мауле, Чили, $M_w8.8$ [4].

При сильном землетрясении происходит разрушение большой зоны сцепления, однако область постсейсмических деформаций значительно превышает размеры области больших косейсмических подвижек, захватывая обширные зоны слабого сцепления, где происходит постсейсмическое проскальзывание (рис 2) и сосредоточено большинство афтершоков [6, 14]. В начальной стадии постсейсмического процесса под воздействием высоких скоростей афтерслипа происходит загиб графика повторяемости афтершоков, отражающий дефицит сильных событий. В основе этого явления лежит эффект конечного размера – максимальная магнитуда афтершоков ограничена характерным размером небольших изолированных аспериты в областях слабого сцепления зоны субдукции. Со временем скорость афтерслипа падает, и распределение землетрясений по магнитуде принимает нормальную форму. Это явление подобно корреляции загиба графика повторяемости со скоростью крипа [11, 12].

Наш анализ показывает, что афтерслип играет определяющую роль в начальный период постсейсмического процесса, что согласуется с результатами других исследований [6, 9, 13, 14]. Характерная форма графика повторяемости ранних афтершоков свидетельствует о значительном асейсмическом проскальзывании, что может дополнительно увеличить вклад афтерслипа в наблюдаемые ранние постсейсмические движения. Медленные объемные деформации земной коры под воздействием вязкоупругой релаксации, по видимому, начинают преобладать на более поздних стадиях постсейсмического процесса [9, 14].

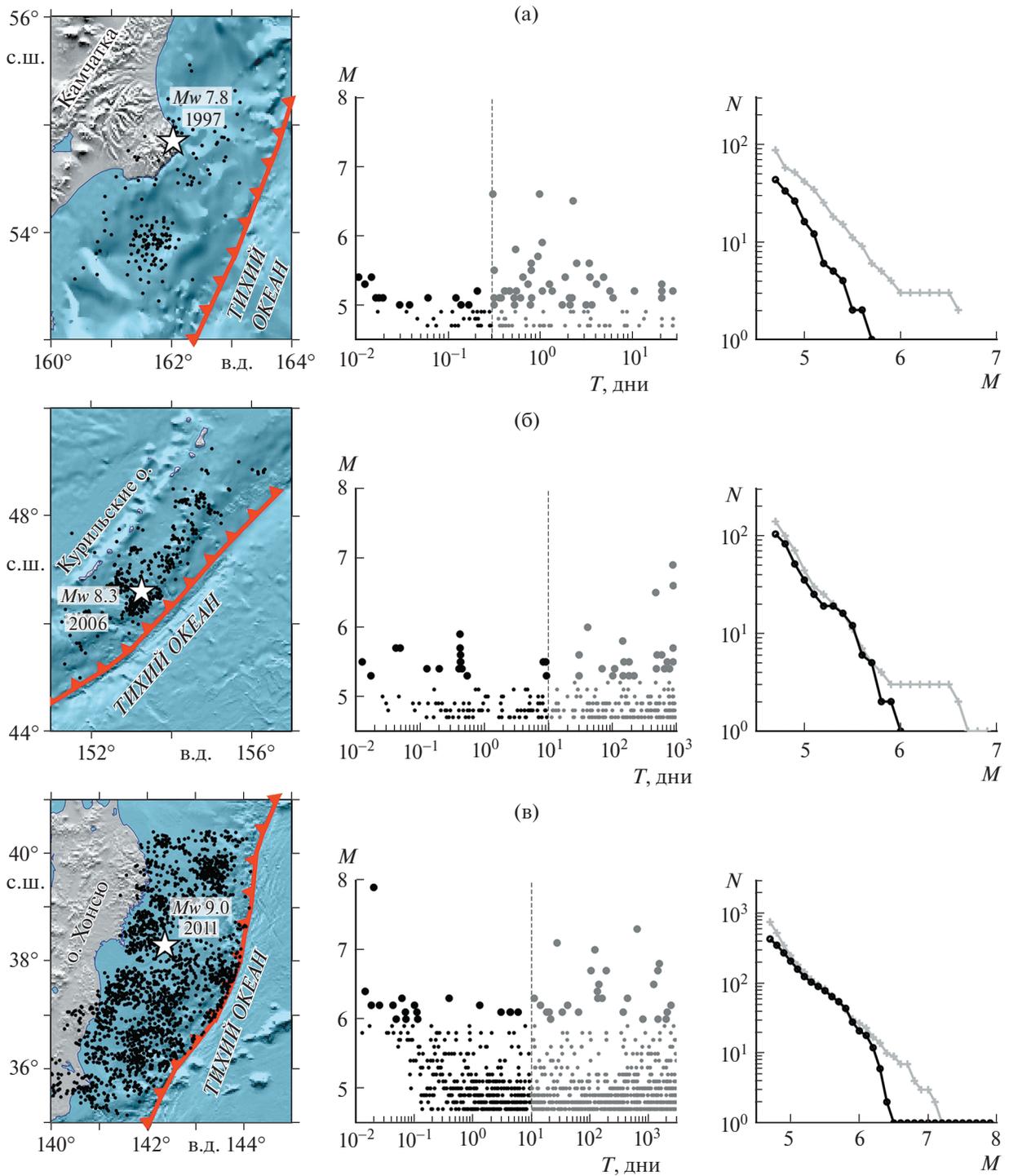


Рис. 1. Афтершоки трех сильных землетрясений (ANSS, $M \geq 4.7$). А) Кроноцкое, Камчатка 1997, $M_w 7.8$; В) Симуширское, Курильские острова 2006, $M_w 8.3$; С) Тохоку, Япония 2011, $M_w 9.0$. Карты афтершоков в слабе, временная последовательность магнитуды афтершоков и графики повторяемости ранних (черная линия, точки) и поздних (серая линия, +) афтершоков. Граница ранних афтершоков для каждого землетрясения отмечена штриховой линией.

Учет дефицита сильных событий непосредственно после основного толчка может быть полезен при моделировании афтершоковых последовательностей: игнорирование этого факта мо-

жет привести к неверной оценке вероятности повторных сильных землетрясений.

Характерные изменения графика повторяемости ранних афтершоков могут проявляться в раз-

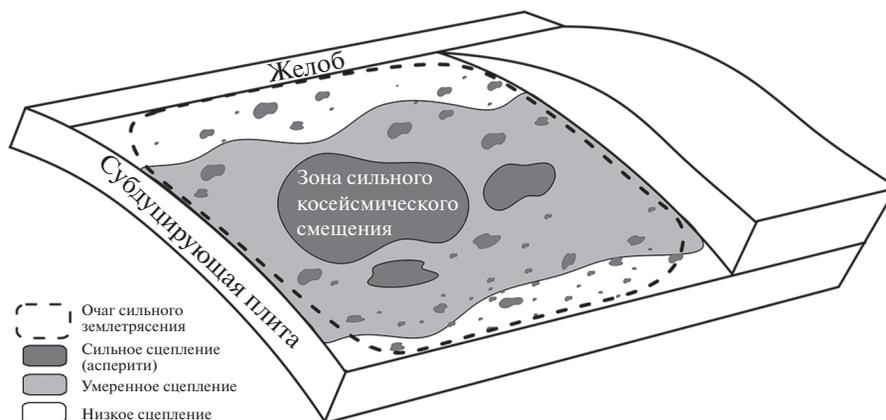


Рис 2. Гетерогенное межплитовое сцепление в зоне субдукции и модель очага сильного землетрясения.

ной степени и на различных временных интервалах, а после некоторых событий могут не проявляться вовсе; это определяется уникальным строением зоны субдукции в очаге конкретного сильного землетрясения. Однако мы предполагаем, что эффект должен, в той или иной степени, проявляться после сильнейших землетрясений, очаги которых простираются на сотни километров и захватывают всю ширину сейсмогенной области от океанического желоба до зоны пластических деформаций в глубине.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках Госзадания ИТПЗ РАН по теме НИР № АААА-А19-119011490127-6 и при поддержке Мегагранта Министерства образования и науки № 14. W03.31.0033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marone C.J., Scholtz C.H., Bilham R.* On the Mechanics of Earthquake Afterslip // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. Is. B5. P. 8441–52. <https://doi.org/10.1029/91JB00275>
2. *DeMets C.* Afterslip No Longer an Afterthought // *Nature.* 1997. № 386. Is. 6625. P. 549. <https://doi.org/10.1038/386549a0>
3. *Ozawa S., Nishimura T., Munekane H., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., Imakiire.* Preceding, Coseismic, and Postseismic Slips of the 2011 Tohoku Earthquake, Japan // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B07404. <https://doi.org/10.1029/2011JB009120>
4. *Lin Y.-N. N., et al.* Coseismic and Postseismic Slip Associated with the 2010 Maule Earthquake, Chile: Characterizing the Arauco Peninsula Barrier Effect // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 3142–3159. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50207>
5. *Wennerberg L., Sharp R.V.* Bulk-Friction Modeling of Afterslip and the Modified Omori Law // *Tectonophysics.* 1997. V. 277. P. 109–136. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00081-4)
6. *Bürgmann R., Kogan M.G., Levin V.E., Scholz C.H., King R.W., Steblov G.M.* Rapid Aseismic Moment Release Following the 5 December 1997 Kronotsky Kamchatka Earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 1331–1334. <https://doi.org/10.1029/2000GL012350>
7. *Barbot S., Fialko Yu.* A Unified Continuum Representation of Post-seismic Relaxation Mechanisms: Semi-analytic Models of Afterslip, Poroelastic Rebound and Viscoelastic Flow // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 182. № 3. P. 1124–1140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04678.x>
8. *Sun T., Wang K.* Viscoelastic Relaxation Following Subduction Earthquakes and its Effects on Afterslip Determination // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2015. V. 120. P. 1329–1344. <https://doi.org/10.1002/2014JB011707>
9. *Muto J., Moore J.D.P., Barbot S., Iinuma T., Ohta Y., Iwamori H.* Coupled Afterslip and Transient Mantle Flow after the 2011 Tohoku Earthquake // *Sci. Adv.* 2019. V. 5. № 9: eaaw1164. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw1164>
10. *Twardzik, C., Vergnolle, M., Sladen, A. et al.* Unraveling the Contribution of Early Postseismic Deformation Using Sub-daily GNSS Positioning // *Sci Rep.* 2019. V. 9. P. 1775. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39038-z>
11. *Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C.* Break of Slope in Earthquake Size Distribution and Creep Rate Along the San Andreas Fault System // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. № 3. P. 6869–6875. <https://doi.org/10.1002/2016GL069636>
12. *Vorobieva I.A., Soloviev A.A., Shebalin P.N.* Mapping of Interplate Coupling in the Kamchatka Subduction Zone from Variations in the Earthquake Size Distribution // *Doklady Earth Sciences.* 2019. V. 484. № 2. P. 173–176. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19020077>

13. Михайлов В.О., Диаман М., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Оценка относительной роли пост-сейсмического крипа и вязкоупругой релаксации после Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. с использованием данных спутниковой геодезии и гравиметрии // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. № 5. С. 84–89.
14. Diao F., et al. Overlapping Post-seismic Deformation Processes: Afterslip and Viscoelastic Relaxation Following the 2011 Mw 9.0 Tohoku (Japan) Earthquake // Geophys. J. Int. 2014. V. 196. P. 218–229. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt376>
15. Lay T., Kanamori H., Ammon C.J., Koper K.D., Hutko A.R., Ye L., Yue H., Rushing T.M. Depth-varying Rupture Properties of Subduction Zone Megathrust Faults // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. B04311 1–21. <https://doi.org/10.1029/2011JB009133>
16. Silverii F., Cheloni D., D'Agostino N., Selvaggi G., Boschi E. Post-seismic Slip of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake from GPS Observations: Implications for Depth-dependent Properties of Subduction Megathrusts // Geophys. J. Int. 2014. V. 198. P. 580–596. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu149>

DEFICIT OF LARGE AFTERSHOCKS AS AN INDICATOR OF AFTERSLIP IN THE SOURCES OF EARTHQUAKES IN SUBDUCTION ZONES

Corresponding member of the RAS P. N. Shebalin^a, I. A. Vorobieva^{a, #}, S. V. Baranov^{a, b},
and Corresponding member of the RAS V. O. Mikhailov^{c, d}

^a Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Federal research center Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

^c Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^d Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

[#] E-mail: vorobiev@mitp.ru

We found a deficit of large aftershocks in the first days after earthquakes in subduction zones, and demonstrate a connection of this phenomenon with aseismic stress release

Keywords: subduction zone, large earthquakes, post-seismic deformation, afterslip, aftershocks