

УДАРНАЯ ВОЛНА, КАК НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНАЯ ПРИЧИНА АНОМАЛЬНО ВЫСОКИХ УСКОРЕНИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ПРИ M_w9.0 ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ ТОХОКУ 11 МАРТА 2011 Г.

Павленко О.В.

Институт физики Земли РАН, Москва, olga@ifz.ru

При землетрясении Тохоку ($M_w=9.0$) 19 станций сильных движений Японии зарегистрировали аномально высокие ускорения $> 1g$, максимальное $\sim 3g$. По записям вертикальных групп KiK-net изучено поведение грунтов при землетрясении и выявлено их «атипичное» поведение: вместо падения модулей сдвига, как обычно наблюдается при сильных движениях, модули сдвига в грунтовых слоях возрастали, показывая упрочнение грунта, и достигали максимумов в моменты наибольшей интенсивности сильных движений, затем снижались. Мы можем объяснить это, предположив, что грунты подвергаются некоторому дополнительному сжатию, вызванному определенным фактором. Наблюдаемые изменения форм акселерограмм землетрясения с удалением от очага: снижение продолжительности и возрастание интенсивности сильных движений - приводят к выводу, что при землетрясении Тохоку образовалась ударная волна, которая сжала грунты и привела к наблюдаемым аномально высоким пиковым ускорениям на поверхности.

Введение

Землетрясение Тохоку с моментной магнитудой $M_w = 9.0$, происшедшее 11 марта 2011 г., относится к крупнейшим землетрясениям субдукционного типа. При этом землетрясении 19 станций сильных движений Японии K-NET и KiK-net зарегистрировали аномально высокие пиковые ускорения (PGA) $> 1g$ (максимальное $\sim 3g$). Многочисленные записи сильных движений, полученные при землетрясении Тохоку, могут помочь понять механизмы возникновения аномально высоких PGA при сильных землетрясениях. Распределение PGA в приразломных зонах землетрясения показано на Рис. 1. Изолиниями показаны подвижки на разломной плоскости землетрясения, в соответствии с «общей моделью» Koketsu et al. [8], полученной как результат тройной инверсии телесейсмических данных, данных по сильным движениям и геодезических GPS данных, с 17%-м превышением веса данных по сильным движениям. В центре подвижки максимальны и достигают ~ 36 м, а к окраинам они спадают до нуля.

Методика исследований и результаты

Для исследования механизмов возникновения аномально высоких PGA прежде всего по записям станций (вертикальных групп) KiK-net изучено поведение грунтов на станциях в приразломных зонах землетрясения. Станции KiK-net состоят из 2-х акселерометров, один из которых установлен на поверхности, а другой на глубине ~ 100 или 200 м (иногда ~ 300 м и больше). Одновременные записи двух приборов позволяют нам смоделировать поведение грунтовых слоев при сильных движениях от поверхности до глубины установки заглубленного прибора. Такие модели поведения грунтов (т.е. вертикальные распределения напряжений и деформаций, вызванных сильными движениями в грунтовых слоях) построены для станций KiK-net в приразломных зонах землетрясения Тохоку. Использован метод, разработанный автором [9] и ранее примененный для изучения поведения грунтов при прошлых сильных землетрясениях Японии: 1995 г. в Кобе ($M_w = 6.8$), 2000 г. в Тоттори ($M_w = 6.7$) (Япония) и 1999 г. в Чи-Чи (Тайвань) ($M_w = 7.6$) [9-11]. Записи заглубленного прибора используются как входной сигнал, и рассчитывается распространение этого сигнала вверх к поверхности. Методом перебора находятся нелинейные зависимости напряжение-деформация в грунтовых слоях, дающие наилучшее соответствие наблюдениям на поверхности. Для прослеживания временных изменений в поведении грунтов записи делятся на интервалы ~ 1.5 с и больше, и вычисления ведутся последовательно в каждом интервале. В результате мы получаем смоделированные акселерограммы на поверхности, аппроксимирующие зарегистрированные, и соответствующие им вертикальные распределения напряжений и деформаций в грунтовых слоях, изменяющиеся во времени (Рис. 2).

Модели поведения грунтов построены для 55-ти ближайших к очагу станций KiK-net, зарегистрировавших максимальные ускорения. Эти модели показывают, что практически на всех этих станциях грунты вели себя «атипично»: вместо существенно нелинейного поведения мягких

грунтов и падения с началом сильных движений и восстановления по окончании сильных движений модулей сдвига в грунтовых слоях, как это обычно наблюдается при нагружении грунтов и как наблюдалось при прошлых сильных землетрясениях, при землетрясении Тохоку поведение грунтов было преимущественно близким к линейному. Модули сдвига в грунтовых слоях возрастали при сильных движениях, показывая упрочнение грунта, и достигали максимумов в моменты наибольшей интенсивности сильных движений, затем снижались со снижением интенсивности сильных движений (Рис. 2).

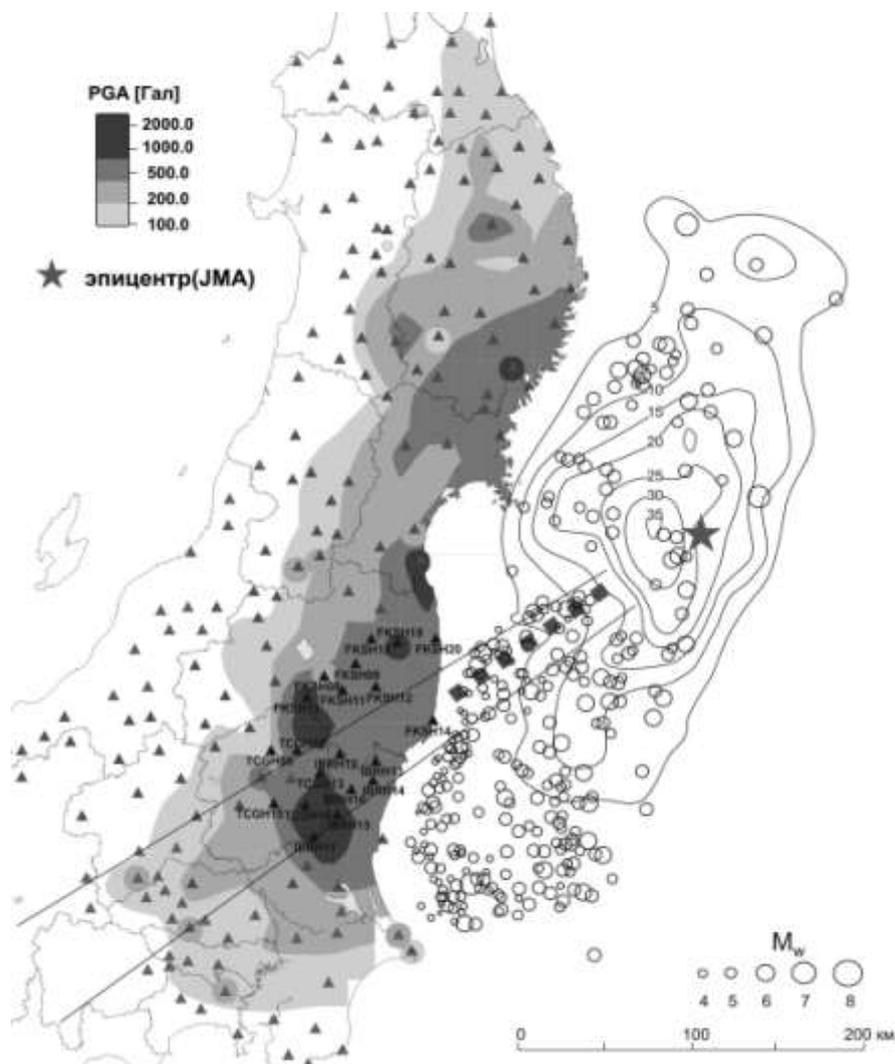


Рис. 1. Распределение PGA, зарегистрированных при землетрясении Тохоку (данные NIED), расположения эпицентра основного толчка (звездочка), афтершоков (кружки) ($M_w > 3$), зарегистрированных в течение 24-х часов после основного толчка, и станций KiK-net (треугольники). Контурные линии показывают распределение подвижек (в м, согласно «общей модели» Koketsu et al. [8]). Толстая пунктирная линия - горизонтальная проекция сегмента разлома, обсуждаемого в тексте.

Грунтовый профиль станции TCGH16 приведен справа на Рис. 2: $V_s \sim 80$ м/с в верхних 4 м, $V_s \sim 160$ м/с в подстилающих 4 м и $V_s \sim 280$ м/с в нижележащих 10 м. Лишь на глубине ~ 18 м V_s возрастает до ~ 400 м/с. Однако в этих мягких грунтах мы не наблюдаем «традиционного» падения модулей сдвига при сильных движениях и существенной нелинейности поведения грунта. Подобное поведение грунта, близкое к линейному, с упрочнением в моменты наибольшей интенсивности сильных движений, наблюдалось на большинстве изученных станций, при разных грунтовых условиях.

На станциях с мягкими грунтами (TCGH16, IBRH11 и др.) снижение модулей сдвига сопровождалось ступенчатым снижением преобладающих частот колебаний (на горизонтальных компонентах). На станциях TCGH16 и IBRH11 частота сильных движений снизилась с ~ 4 Гц до $\sim 2-3$ Гц (Рис. 3). Это же отмечено и для многих станций K-NET с мягкими приповерхностными грунтами [1]. Частота ~ 4 Гц кажется необычно высокой для колебаний слоев приповерхностных мягких грунтов при сильных движениях: по опыту прошлых землетрясений можно было ожидать существенно более низких частот колебаний на мягких грунтах.

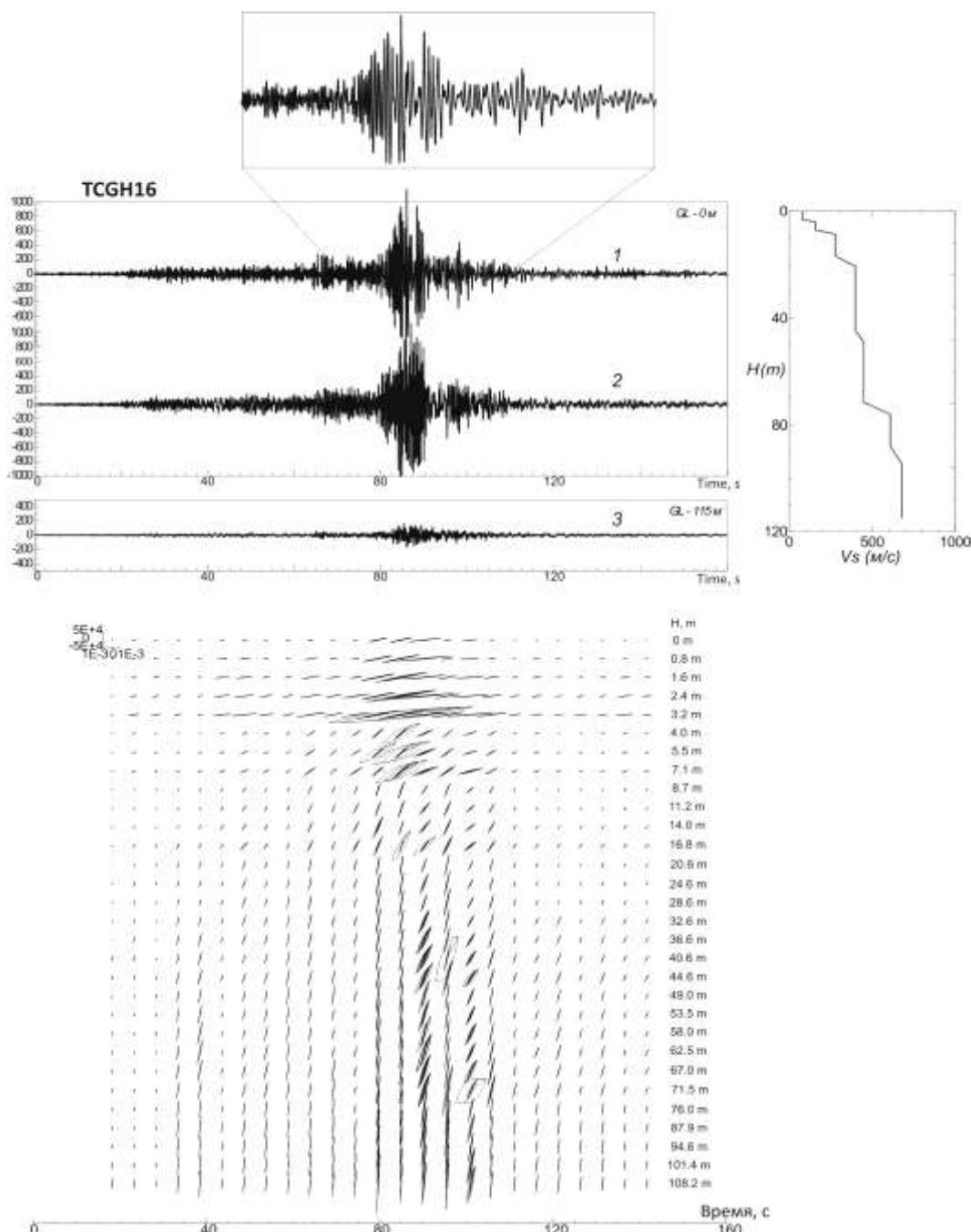


Рис. 2. Акселерограммы основного толчка землетрясения Тохоку на станции TCGH16, компонента EW, зарегистрированная (1) и смоделированная (2), и найденные зависимости напряжение-деформация в грунтовых слоях (напряжения в Па, деформации в отн. ед.), изменяющиеся во времени в продолжение сильных движений.

Обсуждение результатов и заключение

Мы можем понять и объяснить такое «нетипичное» поведение грунтов, если предположить присутствие некоторого действующего на грунты дополнительного сжатия, в результате которого грунт уплотняется и ведет себя более линейно при сильных движениях. Это уплотнение грунта очевидно также вызывает повышенное усиление сейсмических волн в грунтовых слоях при основном толчке землетрясения Тохоку по сравнению со слабыми движениями (например, последующими афтершоками), что отмечалось многими исследователями [6,7]. Это повышенное усиление очевидно внесло свой вклад в возникновение anomalously высоких PGA при землетрясении Тохоку.

Физическим механизмом, создающим дополнительное сжатие, упрочнившее грунты в приразломных зонах землетрясения Тохоку, могут быть ударные волны, образованные в очаге землетрясения. В последние годы появилась серия публикаций, где сейсмологи обсуждают образование ударных волн вследствие сверхбыстрого (быстрее скорости S-волн) распространения трещины в очаге [2,4,5,14].

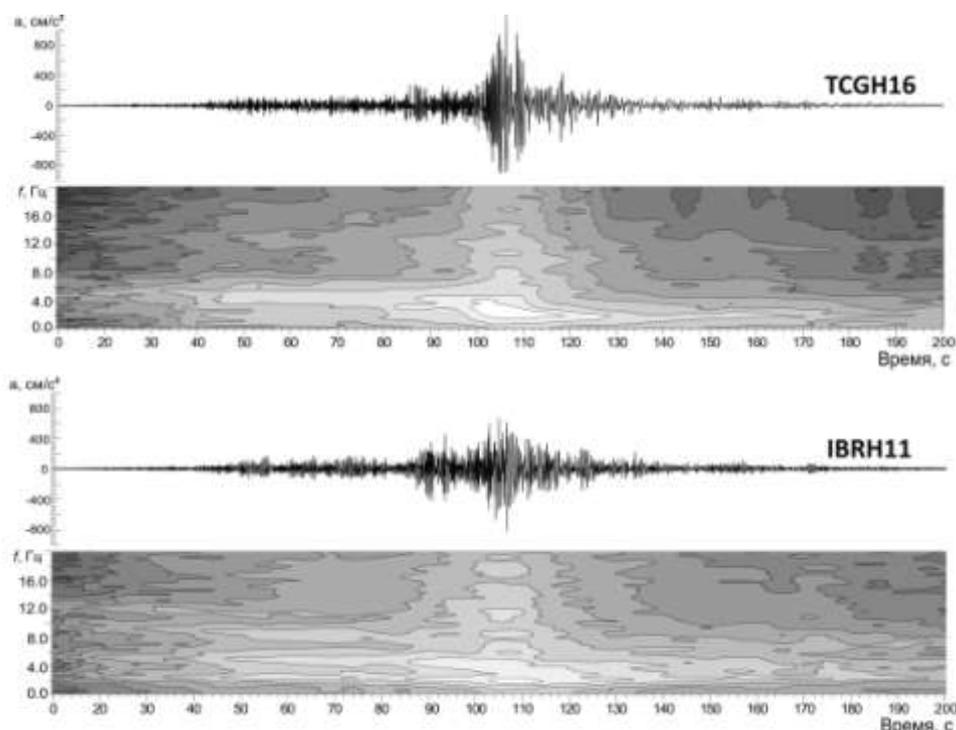


Рис. 3. Акселерограммы и СВАН-диаграммы записей землетрясения Тохоку на станциях TCGH16 и IBRH11, компонента EW. На компонентах NS видны аналогичные эффекты.

Возможность распространения трещин со скоростью выше скорости S-волн теоретически показана в 1970-х. Было показано, что трещина может распространяться либо со скоростью ниже Релеевской ($V < V_R$), либо с межзвуковой скоростью ($V_S < V < V_P$), в зависимости от связующих свойств разлома, хотя распространение трещины с межзвуковой скоростью нестабильно. С тех пор появляется все больше наблюдений распространения трещины с межзвуковыми скоростями. При некоторых сильных землетрясениях скорость распространения разрыва локально превышает скорость поперечных волн на некоторых участках разлома, и генерируются конические фронты ударных волн (волн Маха). Такие явления наблюдались при землетрясениях 1999 г. в Турции [2], при Куьнлуньшаньском землетрясении 2001 г. [3,12], при землетрясении Кококсила (Тибет) 2001 г. [13], и 2002 г. в Денали (Аляска) [5], и при Mw 6.7 афтершоке Охотоморского землетрясения 2013 г. [15]. Также было показано, что субдукционные землетрясения с очень длинной разломной плоскостью, такие как Суматранское землетрясение, могут иметь очень протяженный фронт разрыва на котором в принципе могут достигаться такие же высокие скорости распространения трещины, как при Куьнлуньшаньском землетрясении [12]. Сверхбыстрое распространение трещины обычно сопровождается значительным ростом пиковых ускорений на фронтах Маха, и это очень важно для оценки сейсмической опасности [4].

Если ударная волна возникла в очаге при землетрясении Тохоку, ее можно проследить по формам акселерограмм, изучая их изменения с удалением от очага. Формы акселерограмм землетрясения Тохоку изучены по записям станций KiK-net, расположенных в узких секторах в различных азимутах относительно очага. Для минимизации локальных эффектов использовались записи заглубленных датчиков. Заметные изменения форм акселерограмм с удалением от очага наблюдались в юго-западном направлении (сектор на Рис. 1), на станциях, зарегистрировавших наиболее высокие PGA (Рис. 3); станции расположены на эпицентральных расстояниях 178–316 км.

Из рисунка видно, что с удалением от очага интенсивность сильных движений и PGA заметно не снижаются до ~300 км, тогда как существенно уменьшается продолжительность сильных движений. На расстояниях ~270-310 км (на станциях FKSH10, TCGH10, TCGH16 и IBRH11) она минимальна, при этом PGA возрастают. При дальнейшем увеличении расстояния PGA и интенсивность сильных движений резко падают. Эти изменения форм акселерограмм землетрясения Тохоку с удалением от очага очевидно подтверждают наше предположение об образовании ударных волн при распространении трещины по разломной плоскости землетрясения.

В случае распространения трещины с межзвуковой скоростью ударные волны образуются за счет того, что расстояния между станциями и концом бегущей трещины уменьшаются быстрее, чем распространяются S-волны, так что волны, излученные бегущей трещиной в течение некоторых

достаточно длительных промежутков времени, приходят к станциям в меньшие промежутки времени и накладываются друг на друга; возникает конструктивная интерференция и ударная волна.

При землетрясении Тохоку механизм образования ударных волн очевидно был аналогичным. Простые расчеты показывают, что конструктивная интерференция сейсмических волн могла иметь место на некоторых станциях при землетрясении Тохоку при данной ориентации и размерах разломной плоскости. Однако скорость распространения трещины была не обязательно межзвуковой, а могла иметь обычные до-Релеевские значения (0.7-0.9 V_s).

Для станций, расположенных дальше от эпицентра (FKSH10, TCGH10, TCGH16, IBRH11) расстояние между станциями и концом бегущей трещины уменьшалось быстрее, чем распространялись S-волны, так что волны, излученные бегущей трещиной в течение некоторых промежутков времени, пришли к станциям в меньшие промежутки времени. Поэтому произошло наложение волн и конструктивная интерференция, образование ударных волн и рост PGA. Для более близких к очагу станций (FKSH20, FKSH14) расстояние от конца трещины до станций уменьшалось не так быстро, поскольку это расстояние существенно зависит от глубины, на которой проходит трещина. Сейсмические волны приходят к станциям в обычном порядке, и ударные волны не образуются.

Очевидно так можно объяснить возникновение anomalously высоких ускорений на станциях KiK-net в южной части острова Хонсю FKSH10, TCGH10, TCGH16, IBRH11: конструктивная интерференция сейсмических волн на станциях, расположенных на удалении от очага ~270-310 км, приводит к усилению сильных движений в основаниях грунтовых толщ. Затем воздействие самой ударной волны на грунтовые толщи приводит к упрочнению грунта, возрастанию усиления сейсмических волн в грунтах и anomalously высоким PGA на этих станциях.

Таким образом, anomalously высокие ускорения, наблюдавшиеся при землетрясении Тохоку, очевидно являются следствием комбинации этих механизмов, вызванных действием ударной волны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-05-01143 «Механизмы возникновения anomalously высоких ускорений при сильных землетрясениях».

Список литературы

1. *Bonilla L.F. et al.*, Nonlinear site response evidence of K-NET and KiK-net records. *Earth Planet. Space* 63, 785–789 (2011).
2. *Bouchon M. et al.*, How Fast is Rupture during an Earthquake? New Insights from the 1999 Turkey Earthquakes. *Geoph. Res. Lett.* 28, 2723-2726 (2001).
3. *Bouchon M., Vallée M.*, Observation of Long Supershear Rupture During the Magnitude 8.1 Kunlunshan Earthquake. *Science* 301, 824-826 (2003).
4. *Dunham E. M., Bhat H.S.*, Attenuation of radiated ground motion and stresses from three-dimensional supershear ruptures. *Jour. Geoph. Res.*, 113, B08319 (2008), doi:10.1029/2007JB005182.
5. *Ellsworth W.L. et al.*, Near-Field Ground Motion of the 2002 Denali Fault, Alaska, Earthquake Recorded at Pump Station 10, *Earth. Spectra*, 20, 597–615 (2004).
6. *Irikura K., Kurahashi S.*, paper presented at 15th World Conf. Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24–28 September 2012.
7. *Kawase H. et al.*, paper presented at 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion August 23–26 2011.
8. *Koketsu K.Y. et al.*, A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.* 310, 480–487 (2011).
9. *Pavlenko O.V. and Irikura K.*, Estimation of nonlinear time-dependent soil behavior in strong ground motion based on vertical array data. *Pure Appl. Geophys.* 160, 2365–2379 (2003).
10. *Pavlenko O.V. and Irikura K.*, Nonlinear Behavior of Soils revealed from the Records of the 2000, Tottori, Japan, Earthquake at Stations of the Digital Strong-Motion Network Kik-Net. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, 2131-2145 (2006).
11. *Pavlenko O.V.*, Characteristics of Soil Response in Near-Fault Zones During the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Pure Appl. Geophys.* 165, 1789-1812 (2008).
12. *Robinson D.R., Brough C., Das S.*, The Mw 7.8, 2001 Kunlunshan earthquake: Extreme rupture speed variability and effect of fault geometry. *Jour. Geoph. Res.*, 111, B08303 (2006), doi:10.1029/2005JB004137.
13. *Vallée M., Dunham E.M.*, Observation of far-field Mach waves generated by the 2001 Kokoxili supershear earthquake, *Geoph. Res. Lett.* 39, L05311 (2012), doi: 10.1029/2011GL050725.
14. *Walker K.T., Shearer P.M.*, Illuminating the near-sonic rupture velocities of the intracontinental Kokoxili Mw 7.8 and Denali fault Mw 7.9 strike-slip earthquakes with global P wave back projection imaging, *Jour. Geoph. Res.*, 114, B02304 (2009), doi:10.1029/2008 JB005738.
15. *Zhan Z. et al.*, Supershear rupture in a Mw 6.7 aftershock of the 2013 Sea of Okhotsk earthquake. *Science* 345, 204-207 (2013).