

УДК 550.347.097.33

УДАРНАЯ ВОЛНА КАК ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ АНОМАЛЬНО ВЫСОКИХ УСКОРЕНИЙ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ ТОХОКУ 11 МАРТА 2011 г. ($M = 9,0$)

О. В. Павленко

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 02.07.2018 г.

Поступило 03.07.2018 г.

Предложен механизм генерации аномально высоких ускорений (более $1g$, максимальное $\sim 3g$), зарегистрированных при землетрясении Тохоку 2011 г. ($M_w = 9,0$). По записям вертикальных групп изучено поведение грунтов в приразломных зонах землетрясения и обнаружена его “атипичная” модель: модули сдвига возрастали при сильных движениях, показывая упрочнение грунта, затем снижались. Это можно объяснить, предположив, что грунты испытывали некоторое дополнительное воздействие. Формы акселерограмм показывают снижение продолжительности и возрастание интенсивности сильных движений с удалением от очага, что может указывать на наложение сейсмических волн и образование ударной волны быстро движущимся источником — концом распространяющейся трещины в очаге.

Ключевые слова: сильные движения, землетрясение Тохоку, аномально высокие ускорения, эффекты направленности, ударная волна.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652484198-103>

Разрушительное субдукционное землетрясение Тохоку ($M_w = 9,0$), сопровождавшееся цунами, — наиболее сильное сейсмическое событие, когда-либо зарегистрированное в Японии. 19 станций сильных движений K-NET и KiK-net зарегистрировали аномально высокие пиковые ускорения (PGA), превышающие $1g$; максимальное $\sim 3g$ (рис. 1). Японские сейсмологи отмечают “возникновение аномально сильных движений, каких мы никогда не видели раньше” [1].

Распределение PGA в приразломных зонах (рис. 1) показывает сложную картину излучения и распространения сейсмических волн из протяжённого очага землетрясения. Интересно, что наиболее высокие PGA наблюдались не вблизи очага, а на значительных удалениях; при этом за областью высоких ускорений при дальнейшем удалении от очага ускорения резко снижаются (рис. 1). Особенностью землетрясения является также более высокое усиление сейсмических волн в грунтовых слоях при основном толчке, чем при афтершоках — более слабых движениях [2]. Обычно наблюдается обратное, т.е. снижение усиления при сильных движениях вследствие нелинейности отклика грунта [3–5].

Акселерограммы землетрясения Тохоку с аномально высокими ускорениями имеют вид импульсных сигналов с высокими PGA на всех трёх компонентах. Связаны ли аномально высокие ускорения с эффектами очага, эффектами пути распространения или с локальными эффектами?

Очаговый процесс землетрясения Тохоку изучался многими исследователями; построенные модели очага описывают зависящий от глубины частотный состав излучения, вариации скорости разрыва и распределение подвижек в очаге. В модели очага, построенной на основе телесейсмических данных, записей сильных движений, геодезических данных и данных цунами [6], максимальные подвижки приурочены к эпицентру, они достигают ~ 36 м и спадают до нуля на краях разломной плоскости (рис. 1). В моделях, построенных по записям сильных движений методом эмпирических функций Грина [7], высокие PGA объясняют сложной структурой очага, содержащего 4 или 5 субочагов — областей генерации сильных движений. Существование нескольких субочагов объясняется сложностью события: одновременным вспарыванием ранее существовавших асперити. Однако авторы [7] получили согласие расчётов и наблюдений лишь для близких к очагу станций; в этих моделях интенсивность сильных движений и PGA снижаются

¹ Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Российской Академии наук, Москва

* E-mail: olga@ifz.ru

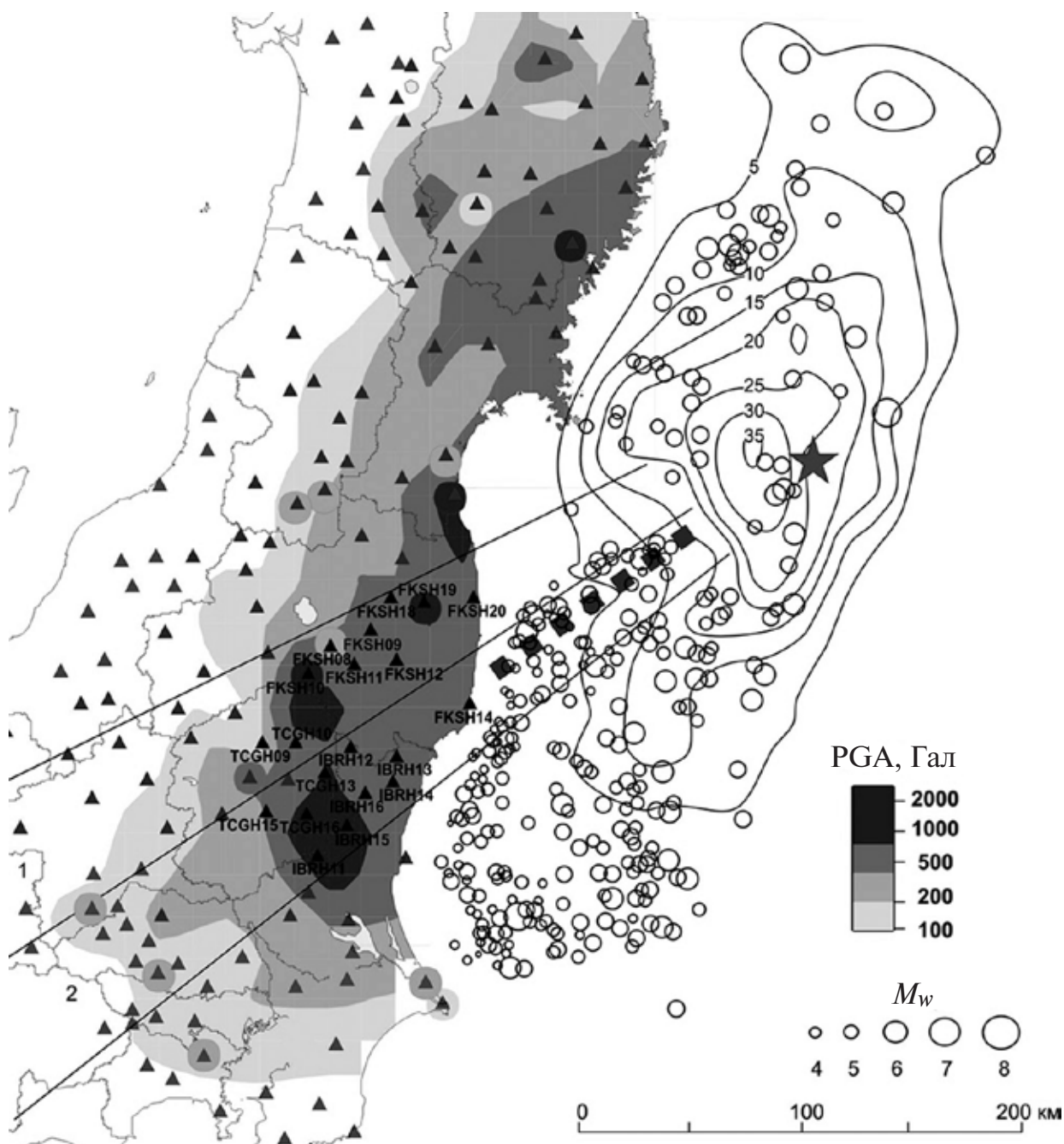


Рис. 1. Распределение пиковых ускорений на о. Хонсю при землетрясении Тохоку (данные NIED), расположения основного толчка (звёздочка), афтершоков с $M > 3$ (кружки), зарегистрированных в 24 часа после основного толчка, и станций KiK-net (треугольники). Изолинии — подвижки на разломной плоскости согласно “общей модели” Koketsu и др. [6]. Квадратами показана горизонтальная проекция сегмента разлома.

с удалением от очага, чего в действительности не наблюдается (рис. 1).

В настоящей работе предлагаются механизмы, которые могут объяснить все наблюдаемые особенности землетрясения Тохоку. Ранее изучено поведение грунтов в приразломных зонах землетрясения Тохоку [8], построены модели поведения — вертикальные распределения напряжений

и деформаций в верхних 100–500 м грунта, изменяющиеся во времени в продолжение сильных движений. При прошлых сильных землетрясениях (1995 г. в Кобе, 2000 г. в Тоттори, 1999 г. в Чи-Чи) подобные модели [3–5] показывали существенно нелинейное поведение приповерхностных мягких грунтов в приразломных зонах и изменения реологических свойств грунтов: снижение модулей

сдвига с началом сильных движений и их восстановление по окончании сильных движений. Наиболее существенные изменения наблюдались на ближайших к очагу станциях ($(\sim 1/4)L$, где L — длина разломной плоскости). С удалением от очага отклик грунта становился все более линейным; практически линейным на удалениях $\sim L$. Нелинейность поведения грунта приводила к заметному снижению ускорений из-за нелинейного поглощения (лишь присутствие грунтовых вод вблизи поверхности и эффекты порового давления могли повысить ускорения) [3–5].

При землетрясении Тохоку не наблюдалось существенной или широко распространённой нелинейности поведения мягких грунтов. Проявления нелинейности отмечены лишь на побережье, вблизи очага. На удалённых станциях, зарегистрировавших максимальные PGA, поведение грунтов атипично: модули сдвига в грунтовых слоях росли и достигали максимумов в моменты наибольшей интенсивности сильных движений, показывая упрочнение грунта, затем снижались (это сопровождалось ступенчатым снижением преобладающих частот колебаний). При этом поведение грунтов было близким к линейному [8].

Движения поверхности при землетрясении Тохоку были преимущественно высокочастотными, с относительно низкими амплитудами в критическом (для построек) диапазоне частот 0,5–1 Гц, поэтому размеры разрушений оказались невелики [1].

Необычное поведение грунтов при землетрясении Тохоку можно объяснить, если предположить некоторое дополнительное воздействие на грунты, при котором грунты уплотнялись и вели себя линейно. Оно могло быть вызвано, например, ударной волной в очаге землетрясения.

Как известно, ударные волны возникают при взрывах, детонации, при движениях тел с около- и сверхзвуковыми скоростями. Их также можно рассматривать как предельный случай накопления нелинейных искажений при распространении волн в нелинейной среде, когда дальнейшие искажения их разрушают, преобразуя в волны малых амплитуд [9]. Существенная кубическая нелинейность, которую проявляют грунты при распространении в них интенсивных сейсмических волн [10], служит основой для образования в них сдвиговых ударных волн. Особенностью сдвиговых ударных волн в средах с кубической нелинейностью является их смешанный тип: нормальный + тангенциальный; они содержат ударные фронты как сжатия, так и разрежения [9]. В медицинской акустике для возбуждения таких волн в биотканях используют источники, движущиеся с околозвуковыми скоростями [9].

В последние годы появляются публикации, описывающие образование ударных волн при сильных землетрясениях, в случаях распространения трещин разрыва со скоростями, превышающими скорости поперечных волн [11–14]. Возможность распространения трещин со сверхсдвиговыми скоростями теоретически показана в 1970-х годах. Трещины сдвига могут распространяться либо с субрэлеевскими ($V < V_R$), либо с межзвуковыми скоростями ($V_S < V < V_P$), хотя такое распространение часто нестабильно. Межзвуковые скорости распространения трещин на отдельных участках разломов и генерация конических фронтов ударных волн (волн Маха) наблюдались при землетрясениях 1999 г. в Турции [11], при Куньлуньском землетрясении 2001 г. [13], при землетрясении 2001 г. в Кококсили (Тибет) [14], при землетрясении 2002 г. в Денали (Аляска) [12], при афтершоке Охотоморского землетрясения 2013 г. Субдукционные землетрясения с протяжёнными очагами также могут иметь длинные фронты разрыва в очаге, где могут достигаться такие же высокие скорости распространения разрыва [13]. Сверхбыстрое распространение трещин сопровождается значительным возрастанием ускорений на фронтах Маха, что очень важно в проблеме оценки сейсмической опасности [13].

Если ударная волна была сгенерирована очагом землетрясения Тохоку, её можно проследить по изменениям форм акселерограмм с удалением от очага. Изучены формы акселерограмм на станциях

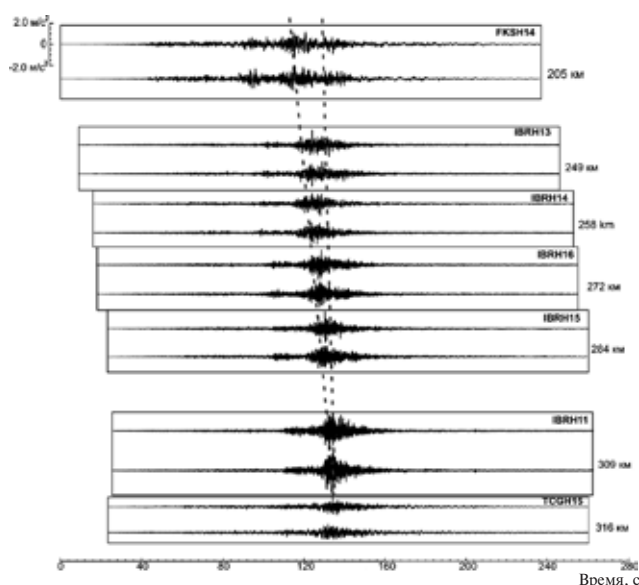


Рис. 2. Акселерограммы (компоненты EW и NS) землетрясения Тохоку на станциях KiK-net в секторе 2 (рис. 1). Справа — эпицентральное расстояние. Хорошо видно снижение длительности сильных движений.

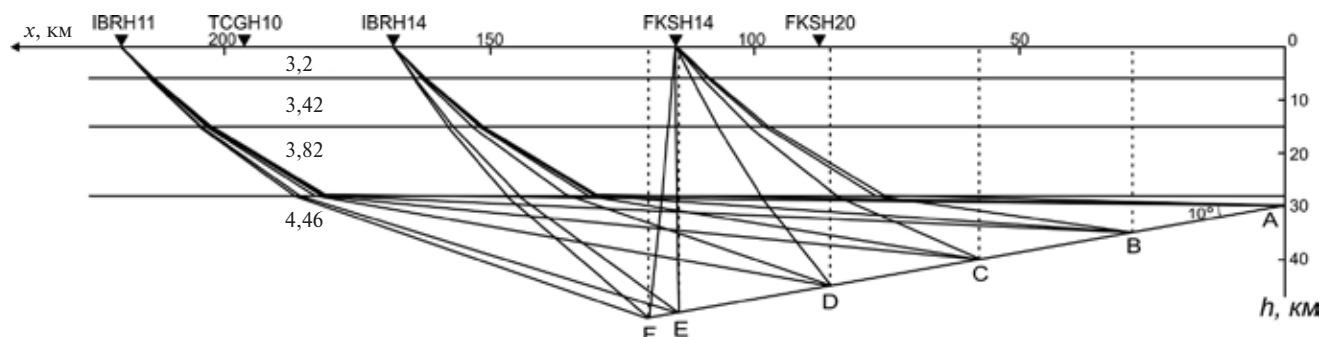


Рис. 3. Разломная плоскость землетрясения Тохоку (разрез), расположение станций KiK-net и пути пробега сейсмических волн. Числами показаны скорости S-волн в слоях, км/с (скоростная модель из работы [7])

KiK-net, расположенных в узких секторах вокруг очага (по записям скважинных приборов, для исключения эффектов грунта). Изменения форм (рис. 2) найдены в секторах, ориентированных в юго-западном направлении на станции, зарегистрировавшие наивысшие PGA (1, 2 на рис. 1). Как видно из рис. 2, пиковые ускорения не снижаются с удалением от очага (до ~310 км), тогда как продолжительность сильных движений уменьшается. На удалениях ~270–310 км длительность сильных движений достигает минимума, а PGA максимальны. С дальнейшим увеличением расстояния PGA резко падают (рис. 1, 2).

При быстром (межзвуковом) распространении трещины ударные волны образуются потому, что расстояние между концом бегущей трещины и станциями уменьшается быстрее, чем распространяются S-волны (волны, излученные концом трещины в течение промежутка времени, достигают станции одновременно). Волны накладываются друг на друга, и возникают ударные фронты (как предельный случай эффектов направленности).

При землетрясении Тохоку не отмечалось сверхбыстрого распространения трещины, но механизм образования ударных фронтов мог быть сходным (рис. 3). Простые расчёты показывают, что

наложение сейсмических волн могло возникнуть при обычных, субрэлеевских ($(0,7-0,9) V_s$) скоростях распространения трещины (табл. 1). На дальние от очага станции (FKSH10, TCGH16, IBRH11) волны, излученные трещиной в течение некоторого промежутка времени, приходят одновременно, образуя ударную волну, тогда как на близкие к очагу станции (FKSH20, FKSH14) волны приходят в обычном порядке (рис. 3). Длительности сильных движений, наблюдавшиеся на станциях KiK-net, достигаются при длине участка разлома $l \sim 120$ км, скорости распространения трещины $V \sim 4,0$ км/с, угле наклона разломной плоскости $\alpha \sim 10^\circ$. Участок разлома l начинается в ~ 80 км от эпицентра и совпадает с областью высокой концентрации афтершоков, что характерно для областей с большой подвижкой, большим падением напряжения и наиболее высокой скоростью разрыва [13].

По оценкам разных авторов, очаг землетрясения Тохоку $\sim 200 \times 500$ км имел сложную структуру и длительность очагового процесса ~ 150 с [15]. Разрыв, вероятно, изменял направление, и имелись дополнительные разломные плоскости [15]. Детали очагового процесса, в которых сходятся разные авторы, могут служить подтверждением предложенных в данной работе механизмов.

Таблица 1. Длительность сильных движений на станциях KiK-net, рассчитанная для распространения трещины по участку разлома при землетрясении Тохоку ($l \sim 120$ км, $\alpha \sim 10^\circ$, $V \sim 4$ км/с)

Момент излучения S-волн концом трещины, с	Координата положения конца трещины на оси X, км			Глубина конца трещины h, км	Время пробега S-волн от конца трещины к станциям KiK-net, с			Время прихода S-волн на станции KiK-net, с		
	FKSH14	IBRH14	IBRH11		FKSH14	IBRH14	IBRH11	FKSH14	IBRH14	IBRH11
0 (A)	115	168	219	30	30,4	42,4	53,9	30,4	42,3	53,9
7,2 (B)	86,5	139,5	190,5	35	24,3	36,1	47,5	31,5	43,3	54,7
14,4 (C)	58	111	162	40	18,4	29,9	41,3	32,8	44,3	55,7
21,6 (D)	29,5	82,5	133,5	45	14,0	23,9	35,0	35,6	45,5	56,6
28,8 (E)	1	54	105	50	12,8	18,7	29,1	41,6	47,5	57,9
30,2 (F)	-4,7	48,3	99,3	51	13,2	18,0	27,8	43,4	48,2	58,0
Длительность сильных движений								13,0	5,9	4,1

Построенные разными авторами модели очага показывают сложную временную эволюцию, особенно в первую минуту, однако затем большинство моделей указывают на продолжительное, более 100 с, одностороннее распространение трещины в юго-западном направлении [6, 15] (пунктир на рис. 1) со скоростью $\sim 3,5$ км/с в предположении, что среда — однородное полупространство с $V_s \sim 3,47$ км/с.

Пост-сейсмические события, триггерированные землетрясением Тохоку, систематически распространялись в том же юго-западном направлении; фронт распространения имел скорость 3,1–3,3 км/с и протянулся на расстояние ~ 1350 км [15]. Гораздо меньше триггерных землетрясений зарегистрировано в северном направлении [15].

Разломная плоскость Тохоку обладала большой неоднородностью, поскольку содержала пространственно разделённые области высокочастотного и низкочастотного излучения в глубокой и мелкой частях очага; в этом сходятся разные авторы. Значительные вариации физических свойств очевидно дадут вариативность скоростей распространения трещин в разных частях очага.

Зона предполагаемого распространения трещины со скоростью ~ 4 км/с (квадраты на рис. 1) находится в области высокоскоростных аномалий (4–6%) [15]. С учётом больших размеров разломной плоскости вероятно предположение, что трещина имела скорость ~ 4 км/с на участке разлома $l \sim 110$ – 120 км в течение ~ 30 с из ~ 100 с распространения трещины в юго-западном направлении. Трещина могла разогнаться до больших скоростей потому, что на этих участках разлома в прошлом неоднократно происходили землетрясения [15] и прошлые подвижки облегчили скольжение.

Таким образом, возможное объяснение аномально высоких PGA и других особенностей землетрясения Тохоку: сейсмические волны, излученные трещиной при её распространении по участку разлома, отмеченному квадратами на рис. 1, приходят на станции (TCGH16, IBRH11, FKSH10 и др.) практически одновременно и образуют (в основаниях грунтовых толщ) ударную волну. Воздействие самой ударной волны на грунты упрочняет их, и растёт усиление сейсмических волн в грунтовых толщах. Эти эффекты и приводят к аномально высоким ускорениям, наблюдавшимся при землетрясении Тохоку на удалённых от очага станциях.

Записи землетрясения Тохоку и параметры грунтовых профилей любезно предоставлены Службой регистрации сильных движений Японии (www.k-net.bosai.go.jp).

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 17–05–01143.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furumura T., Takemura S., Noguchi S., Takemoto T., Maeda T., Iwai K., Padhy S. // *Landslides*. 2011. № 8. P. 333–338.
2. Nagashima F., Kawase H., Mutsushima S., Sanchez-Sesma F. J., Hayakawa T., Satoh T., Oshima M. // In: *Proc. 15th World Conf. Earthquake*. 24–28 September. Eng. Lisbon. 2012.
3. Pavlenko O. V., Irikura K. *Pure and Appl. Geophys.* 2003. V. 160. P. 2365–2379.
4. Pavlenko O. V., Irikura K. // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2006. V. 96. P. 2131–2145.
5. Pavlenko O. V. // *Pure and Appl. Geophys.* 2008. V. 165. P. 1789–1812.
6. Koketsu K. Y., Yokota Y., Nishimura N., Yagi Y., Miyazaki S., Satake K., Fujii Y., Migake H., Sakai S., Yamanaka Y., Okada T. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 310. P. 480–487.
7. Asano K., Iwata T. // *Earth and Planet. Space*. 2012. V. 64. № 12. P. 1111–1123.
8. Павленко О. В. // *ДАН*. 2017. Т. 476. № 6. С. 698–705.
9. Руденко О. В., Сапожников О. А. // *УФН*. 2004. Т. 174. № 9. С. 973–989.
10. Pavlenko O. V., Irikura K. // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 19. P. 36–1–36–4.
11. Bouchon M., Bouin M.-P., Karabulut H., Toksoz M. N., Dietrich M., Rosakis A. J. // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 2723–2726.
12. Ellsworth W. L., Celebi M., Evans J. R., Jensen E. G., Kayen R., Metz M. C., Nyman D. J., Roddick J. W., Spudich P., Stephens C. D. *Earth. Spectra*. 2004. V. 20. P. 597–615.
13. Robinson D. R., Brough C., Das S. // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. B08303.
14. Vallee M., Dunham E. M. // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L05311. DOI: 10.1029/2011GL050725.
15. Tajima F., Mori J., Kennet B. L. N. // *Tectonophysics*. 2013. V. 586. P. 15–34.

SHOCK WAVE AS POSSIBLE MECHANISM FOR THE GENERATION OF ABNORMALLY HIGH ACCELERATIONS DURING THE $M = 9.0$ TOHOKU EARTHQUAKE ON MARCH 11, 2011

O. V. Pavlenko

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin July 2, 2018

Received July 3, 2018

This study proposes a mechanism for the generation of anomalously high accelerations (over 1g, maximum up to approximately 3g) recorded during the 2011 Tōhoku earthquake ($M_w = 9.0$). Soil behavior in the fault zones of the earthquake is examined based on the records of vertical groups, and the earthquake's "atypical" model is determined: shear moduli increased during strong motions, which are indicative of soil strengthening, and then decreased. That which can be explained by an assumption of soils being subjected to some additional impact. Accelerogram curves show a decrease in the duration and an increase in the intensity of strong motions with distance from the earthquake source, which may be indicative of superposition of seismic waves and generation of shock waves by a rapidly moving source — the tip of the fracture in the earthquake source.

Keywords: strong motion, the Tohoku earthquake, abnormally high accelerations, directivity effects, shock wave.