

Crustal displacements of East Asia caused by the Tohoku earthquake of March 11, 2011, Mw =9.0

N.V. Shestakov^{1,2}, Hiroaki Takahashi³, Mako Ohzono³, V.G. Bykov⁴, M.D. Gerasimenko¹, A.S. Prytkov⁵, V.A. Bormotov⁴, M.N. Luneva⁴, A.G. Kolomiets¹, G.N. Gerasimov¹, N.F. Vasilenko⁵, Jeongho Baek^{6,7}, Pil-Ho Park⁷, A.A. Sorokin⁸, V.F. Bakhtiarov⁹, N.N. Titkov⁹, S.S. Serovetnikov⁹

¹ – Institute of Applied Mathematics, FEB RAS, Vladivostok, Russia

² – Kwangwoon University, Seoul, South Korea

³ – Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

⁴ – Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk, Russia

⁵ – Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

⁶ – Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, South Korea

⁷ – University of Science and Technology, Daejeon, South Korea

⁸ – Data processing center, FEB RAS, Khabarovsk, Russia

⁹ – Kamchatkan Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

The Great Tohoku earthquake Mw = 9.0 occurred at 5:46 UTC on March 11, 2011 near the northeastern coast of Honshu Island, Japan. It was one of the largest seismic events occurred during the last 100 years. The destructive tsunami generated by the earthquake was observed along the Pacific coast of Japan and detected in a broad area around Japan.

The epicenter of the 2011 Tohoku earthquake was located on the subducting active plate boundary between the Pacific and North American or Eurasian plates depending on the assumed plate boundary configuration. A series of large fore- and aftershocks preceded and have still been succeeding the mainshock. More than 60 these events had magnitudes greater or equal to 6.0.

Long-period stress accumulation in this region is caused by the Pacific plate subduction beneath the Japan Island Arc with relative velocity 91-92 mm/yr with respect to Eurasia or 83 mm/yr with respect to North American plate.

According to the numerous seismic and geodetic observations the 2011 Great Tohoku earthquake displays the thrust faulting mechanism with the maximum slip value varying from 10 to more than 50 m. The estimated rupture length is ranging from 300 to 500 km according to the different fault models.

In contrast to the Sumatra-Andaman region, this seismic event occurred near the highly populated region almost uniformly covered by dense geodetic, seismic and other type geophysical networks. That is why a lot of invaluable measurement information becomes available from the

nearest to the earthquake epicenter zone. This information is intensively analyzing now.

The 2011 Tohoku earthquake caused large co- and postseismic crustal displacements and deformations over the Japanese Islands. The eastward horizontal coseismic displacements and subsidence greater than 4.0 m and -0.6 m were observed, respectively, in the area closest to the epicenter by the GPS Earth Observation Network (GEONET) operated by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI). Almost all the other areas of Japan exhibit significant crustal deformations ranging from one centimeter to a few decimeters (see figure). The intense eastward postseismic horizontal displacements have still been continuing in Northern Honshu. Their maximum value had reached 50 cm by May 1, 2011.

The most intense coseismic deformations outside of the Japanese Islands (up to 4-5 cm) had occurred in the area striking westward from the epicenter and covering the southern of continental part of the Russian Far East, territories of South and North Korea and North East China. Notable coseismic deformations ranging from several millimeters to 1.5 cm approximately were also observed in the adjacent continental regions (see figure).

Almost all detected offset vectors are oriented approximately toward the epicenter. This result speaks either in favor of a single-segment rupture of a relatively short length striking approximately along the Japan Trench and located eastward from Northern Honshu or the existence of a compact area near the epicenter characterized by a very intense slip with respect to other rupture segments. Therefore, the 2011 Tohoku earthquake should be characterized by far large maximum slip value as compared to the Great Sumatra-Andaman multi-segment event.

A size of the region displaying measurable coseismic deformations caused by the 2011 Tohoku earthquake is smaller with respect to the area affected by the Great Sumatra-Andaman quake for which 5-10 mm coseismic jumps were detected at stations located more than 3,000 km away from the earthquake epicenter

It is interesting that among three processed continuous GPS stations distributed over Sakhalin Island not a single observation site detected notable coseismic offset. However in contrast to Sakhalin, Kunashir Island exhibits almost northward coseismic offset with a magnitude of about 10 mm. This point to the proximity of the area to the nodal plane of the rupture and imposes constraints on its northern extension.

A simple preliminary rectangular fault model with a uniform slip was developed based on GPS-detected far-field coseismic displacements under the homogenous elastic half-space assumption. A single-segment rupture of $200 \times 96 \text{ km}^2$ with oblique slip of about 22.9 m, characterized by the seismic moment of $1.32 \cdot 10^{22} \text{ Nm}$ ($M_w=8.7$) was obtained from GPS data inversion. Our model in general describes well both far- and near-field coseismic deformations and approximately constrains the major slip area. However, the Kanto region and the area located near the southern edge of the fault plane surface projection show significant disagreement with our

coseismic displacement estimates. This fact can be explained by a relatively low slip resolution of our model and rupture length underestimation. The far-field data are sensitive to the most intense slip only. Therefore, we cannot resolve for the southern part of the rupture characterized by far less slip values. Nevertheless, our simple model demonstrates a possibility of fast preliminary source parameter determination of a large earthquake using a sparse regional GPS network. This result is very important for the tsunami early warning system development.

GPS stations in the south of the Russian Far East, North East China and the Korean Peninsula exhibit the postseismic displacements along with coseismic deformations. The maximum magnitudes of postseismic offset detected at some of the network stations already exceeded 25% of appropriate coseismic offset value and have still been continuing. The character of postseismic deformations tell in favor of afterslip nature of the observed postseismic signals.

The significant part of our observation GPS network is performing the high-sampling rate (1-Hz) data recording. A number of good waveforms of the long-period surface waves were obtained from these systems. These data provide us a possibility to study various characteristics of the low-frequency wave propagation, viscoelastic and rheological properties of the earth's crust between the Japanese Islands and the continent, etc.

Движения земной коры Восточной Азии, вызванные землетрясением Тохоку 11 марта 2011г., Mw =9.0

Н.В. Шестаков^{1,2}, Хироаки Такахаша³, Мако Охзоно³, В.Г. Быков⁴, М.Д. Герасименко¹, А.С. Прытков⁵,
В.А. Бормотов⁴, М.Н. Лунева⁴, А.Г. Коломиец¹, Г.Н. Герасимов¹, Н.Ф. Василенко⁵, Джеонгхо Баек^{6,7},
Пил-Хо Парк⁷, А.А. Сорокин⁸, В.Ф. Бахтияров⁹, Н.Н. Титков⁹, С.С. Сероветников⁹

¹ – Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

² – Университет Кванун, г. Сеул, Республика Корея

³ – Институт сейсмологии и вулканологии Хокайдского университета, г. Саппоро, Япония

⁴ – Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

⁵ – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

⁶ – Корейский институт астрономии и космических исследований, г. Дайджон, Республика Корея

⁷ – Университет науки и технологий, г. Дайджон, Республика Корея

⁸ – Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск

⁹ – Камчатский филиал геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

11 марта 2011г. в 05:46UTC у тихоокеанского побережья о. Хонсю произошло одно из сильнейших за последние 100 лет землетрясений с магнитудой Mw = 9.0 (землетрясение Тохоку), породившее катастрофическое цунами, вызвавшее большие разрушения на восточном побережье Японских островов. Очаг сейсмического события находился вблизи конвергентной границы, вдоль которой Тихоокеанская плита погружается (субдуцирует) под Северо-Американскую или Евразийскую плиту, в зависимости от принятой конфигурации их границ. Землетрясению Тохоку предшествовала серия сильных форшоковых сейсмических толчков, а после основного события последовала серия многочисленных афтершоков, 62 из которых имели магнитуду Mw ≥ 6.0 и которые продолжаются до сих пор.

Накоплению напряжений в данном районе способствует быстрое относительное движение Тихоокеанской плиты, происходящее со скоростью около 80мм/год. Согласно многочисленным сейсмологическим и геодезическим определениям механизм очага землетрясения – пологий взброс-меганадвиг со стороны Тохоку. Амплитуда смещений в очаговой области по разным оценкам достигает 30-50 м, а длина сейсморазрыва около 400 км.

В отличие от Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г., данное сейсмическое событие произошло вблизи густонаселенной территории, полностью покрытой плотными сетями сейсмологических, геодезических и иных типов геофизических наблюдений, что позволило получить значительный объем разнообразной измерительной информации в

ближней к эпицентру зоне, интенсивный анализ которой сейчас продолжается.

Землетрясение Тохоку вызвало значительные смещения и деформации земной коры. По данным японской национальной GPS-сети GEONET ближайшие к эпицентру районы Японии испытали косейсмические смещения к востоку и юго-востоку, а также опускание. Максимальная величина горизонтальной и вертикальной подвижки составила 4,4 м и -0,75 метров, соответственно. В последующие после землетрясения дни наблюдались значительные постсейсмические смещения, максимальная величина которых, по данным Японского агентства геопространственных данных (GSI), к 12 мая достигла 53 см.

Горизонтальные косейсмические смещения земной коры, варьирующие от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, также были зарегистрированы и в удаленной от эпицентра зоне – на юге Дальнего Востока РФ, на территории Восточного Китая и всем Корейском полуострове. Наиболее интенсивные подвижки до 4-5 см произошли на юге Приморского края и Корейском полуострове, а также расположенных к востоку от него островах. Все векторы смещений ориентированы в направлении эпицентра землетрясения, что указывает на относительно небольшие размеры сейсморазрыва, который, однако, характеризуется значительно большей максимальной величиной смещения в очаге по сравнению с Суматро-Андаманским землетрясением. На это указывают также и меньшие размеры области измеримых GPS-методами косейсмических смещений (более 1мм), размеры которой не превосходят по нашим оценкам 2500-2900км к западу от эпицентра. Интересно отметить, что ни одна из трех GPS станций, расположенных на о. Сахалин (г. Южно-Сахалинск, Углегорск, Оха) не зарегистрировала сколько-нибудь значительных косейсмических-смещений, в отличие от станции KUNA (о. Кунашир), демонстрирующей подвижку к северу с амплитудой около 10 мм, что объясняется ее расположением вблизи нодальной плоскости сейсморазрыва.

Путем инверсии оценок косейсмических смещений GPS пунктов дальней зоны была построена предварительная модель очага землетрясения Тохоку в виде одной плоскости разрыва размерами $200 \times 96 \text{ км}^2$ и равномерным смещением по ней, равным 22.9 м. Полученный сейсмический момент $M_0 = 1.3 \cdot 10^{22} \text{ Нм}$ соответствует моментной магнитуде $M_w = 8.7$, что несколько меньше соответствующего ее значения по сейсмологическим данным. Построенная простая модель вполне удовлетворительно объясняет косейсмические горизонтальные смещения в дальней и ближней зоне, за исключением района Канто и небольшой области южнее г. Сендай, демонстрирующей значительно большие смещения чем предсказывает наша модель. Этот эффект, а также занижение магнитуды, по-видимому, связаны с достаточно низкой разрешающей способностью нашей модели, которая не позволяет учесть влияние южной части сейсмического разрыва, смещения в которой значительно меньше чем по северному участку, на котором реализовались основные

подвижки в очаге. Именно этот участок наиболее интенсивных смещений, наиболее вероятно, фиксируется нашей моделью. Тем не менее, полученный результат показывает, что на базе редкой региональной GPS сети можно оперативно и с достаточно высокой точностью оценить параметры очага удаленного землетрясения, в том числе характер и величину смещения по разрыву, сейсмический момент и моментную магнитуду, что имеет важное значение для организации работы службы раннего предупреждения о цунами.

Данные GPS станций, расположенные на юге Приморья, северо-востоке Китая и в Южной Корее, также зарегистрировали и продолжают регистрировать заметные постсейсмические смещения величина, которых для отдельных пунктов (VLAD, Владивосток) достигла 25% от косейсмической подвижки. Характер этих смещений указывает на продолжающийся афтерслип в плоскости сейсморазрыва.

Поскольку, в настоящее время, значительная часть пунктов GPS-наблюдений осуществляет регистрацию спутниковых сигналов с интервалом 1 сек (1Гц), удалось получить большое количество записей поверхностных колебаний, дающих обширный материал для изучения характеристик и особенностей распространения низкочастотных волн, а так же реализации косейсмических смещений, порожденных землетрясением Тохоку.

Эти и другие полученные результаты будут представлены в докладе.