

УДК 550.34

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ИНИЦИИРОВАННЫХ ГЛУБОКОФОКУСНЫМ ОХОТОМОРСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 24.05.2013 г., $M_w = 8.3$

© 2014 г. Н. В. Шестаков, М. Ohzono, Н. Takahashi, М. Д. Герасименко, В. Г. Быков, академик Е. И. Гордеев, В. Н. Чебров, Н. Н. Титков, С. С. Сероветников, Н. Ф. Василенко, А. С. Прытков, А. А. Сорокин, М. А. Серов, М. Н. Кондратьев, В. В. Пупатенко

Поступило 17.02.2014 г.

DOI: 10.7868/S086956521422023X

Уникальное сейсмическое событие — сильнейшее за всю историю инструментальной сейсмологии глубокофокусное Охотоморское землетрясение ($M_w = 8.3$) произошло 24 мая 2013 г. в 05:45 UTC в Охотском море вблизи западного побережья полуострова Камчатка. Гипоцентр землетрясения по сейсмологическим данным располагался на глубине 609–630 км вблизи нижнего края северо-западной части погружающейся Тихоокеанской литосферной плиты, являющейся частью

Курило-Южно-Камчатской сейсмофокальной зоны (рис. 1). Землетрясение сопровождалось серией афтершоков, что не типично для глубокофокусных событий [1], и вызвало глобальный макросейсмический эффект, характеризующийся сложным распределением интенсивности сотрясений [2].

Целью настоящей работы являются исследование и моделирование по данным непрерывных GPS-измерений косейсмических смещений земной коры, инициированных Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г., и построение дислокационной модели очага землетрясения.

Впервые методами спутниковой геодезии удалось зафиксировать, получить величины и изучить распределение косейсмических смещений, вызванных мощным глубокофокусным сейсмическим событием. По этим данным с учетом сейсмологической информации построена дислокационная модель очага Охотоморского землетрясения.

Для получения косейсмических смещений земной коры использовались данные непрерывных GPS-наблюдений (см. рис. 1) с шагом дискретизации 30 с в пунктах комплексной геодинимической GPS/ГЛОНАСС-сети ДВО РАН [3], Камчатской GPS-сети КФ ГС РАН [4], сети Международной GNSS службы (IGS) и самого северного пункта японской национальной геодинимической сети GEONET – Wakkanai. Математическая обработка суточных файлов спутниковых измерений производилась только по сигналам системы GPS при помощи программного пакета BERNESE 5.0 по вторым разностям фазовых измерений [5]. Полученные решения приведены в систему координат ITRF2008 путем обработки данных региональных спутниковых сетей совместно с опорными пунктами — станциями IGS (URUM, WUHN, ULAB, IRKT, TIXI, FAIR), расположенными вне зоны предполагаемых косей-

*Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток
Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток*

Университет Ямагата, Япония

Хоккайдский университет, Институт сейсмологии и вулканологии, Саппоро, Япония

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Хабаровск

Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Петропавловск-Камчатский

Камчатский филиал Геофизической службы Российской Академии наук, Петропавловск-Камчатский

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Южно-Сахалинск

Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Хабаровск

Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Благовещенск Амурской обл.

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Магадан

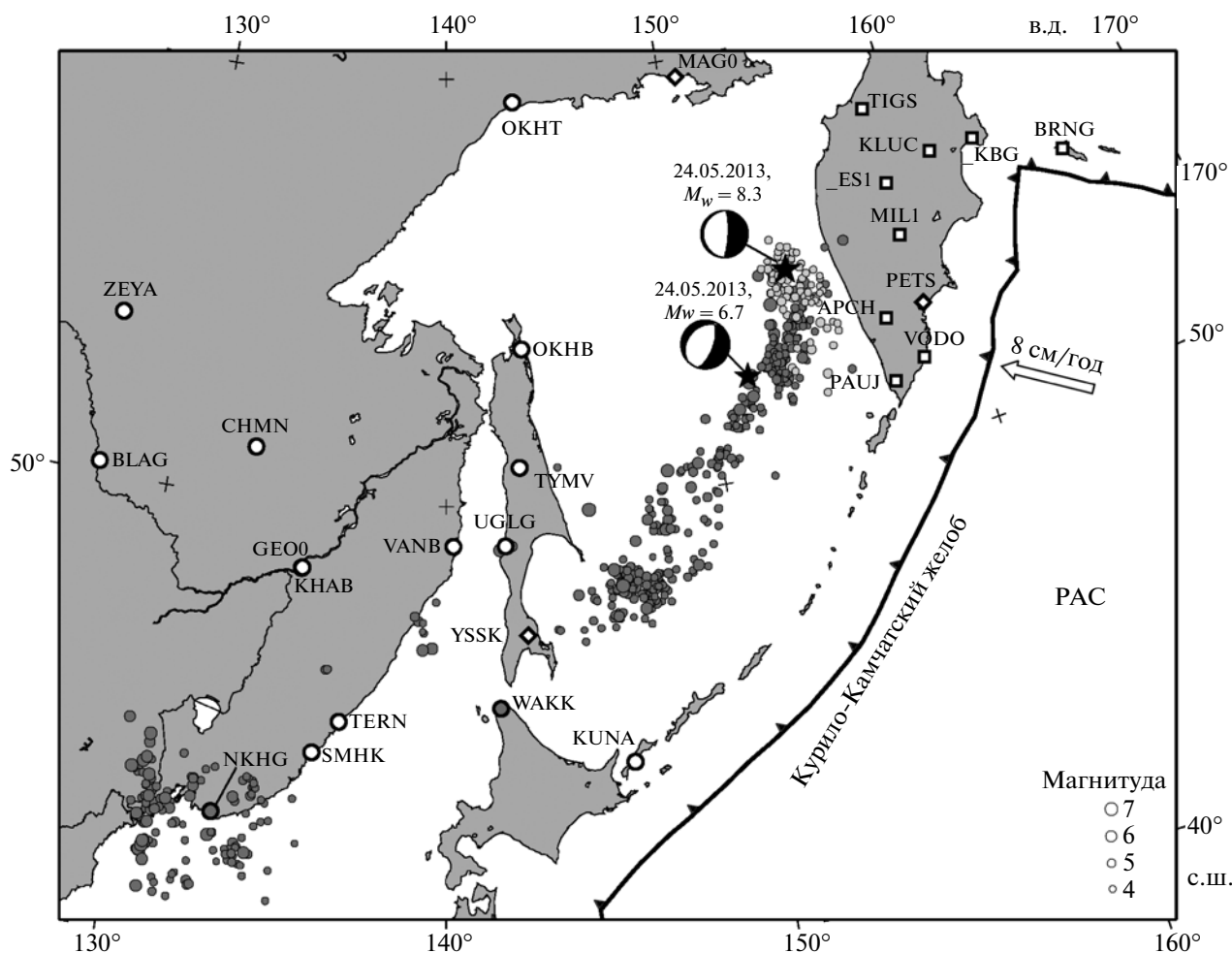


Рис. 1. Размещение пунктов непрерывных GPS-наблюдений. Белыми кружками с черной каймой показаны пункты комплексной геодинимической GPS/ГЛОНАСС-сети ДВО РАН, квадратиками – станции Камчатской GPS-сети КФ ГС РАН, ромбами – пункты сети IGS. Пункт NKHG принадлежит ООО «НПИГПР», г. Находка. GPS-станция WAKK входит в состав японской национальной GPS-сети GEONET. Серыми кружками обозначены эпицентры глубокофокусных землетрясений ($H > 400$ км) за период 1900–2014 гг. по данным NEIC. Светлыми кружками показаны афтершоки главного толчка 24.05.2013 г., $M_w = 8.3$ за временной интервал 24.05–28.06.2013 г. по данным КФ ГС РАН. Механизмы очагов, положения эпицентров и моментные магнитуды главного толчка и сопутствующего ему сейсмического события с магнитудой $M_w = 6.7$ приведены по данным GCMТ. Большая светлая стрелка определяет направление и скорость горизонтального движения Тихоокеанской литосферной плиты (РАС).

смических деформаций. Методика вычисления величин косейсмических смещений ясна из рис. 2. Параметры линейной регрессии, которой аппроксимировались ряды пространственных положений каждой GPS-станции до и после землетрясения, определяли методом наименьших квадратов. Данные GPS-измерений в интервале 00:00–06:00 UTC 24 мая были исключены из обработки для корректного получения координат пунктов непосредственно после главного толчка. Для более точного и надежного выделения косейсмически полученные временные ряды сглажены региональным фильтром [6]. Для этого GPS-пункты с ожидаемыми смещениями были разделены на 3 группы: Камчатка (10 пунктов), Приморье–Хабаровский край–Сахалин–Хоккайдо–Куна-

шир (15 пунктов) и кластер, состоящий из пунктов MAG0 и ОКНТ. Пример сглаженных временных рядов представлен на рис. 2. Распределение полученных косейсмических смещений показано на рис. 3, а их значения приведены в табл. 1.

Максимальные величины горизонтальных подвижек достигают 15 мм (пункт MIL1), вертикальных смещений –19 мм (станция APCH). Как видно из рис. 3а, уверенно регистрируемые GPS-методами горизонтальные косейсмические движения земной коры охватили практически все побережье Охотского моря, п-ов Камчатка, о. Сахалин, побережье Татарского пролива. Согласно сообщениям [7, 8] косейсмические подвижки также наблюдались GPS-методами на северных Курилах и в западной части Алеутской островной

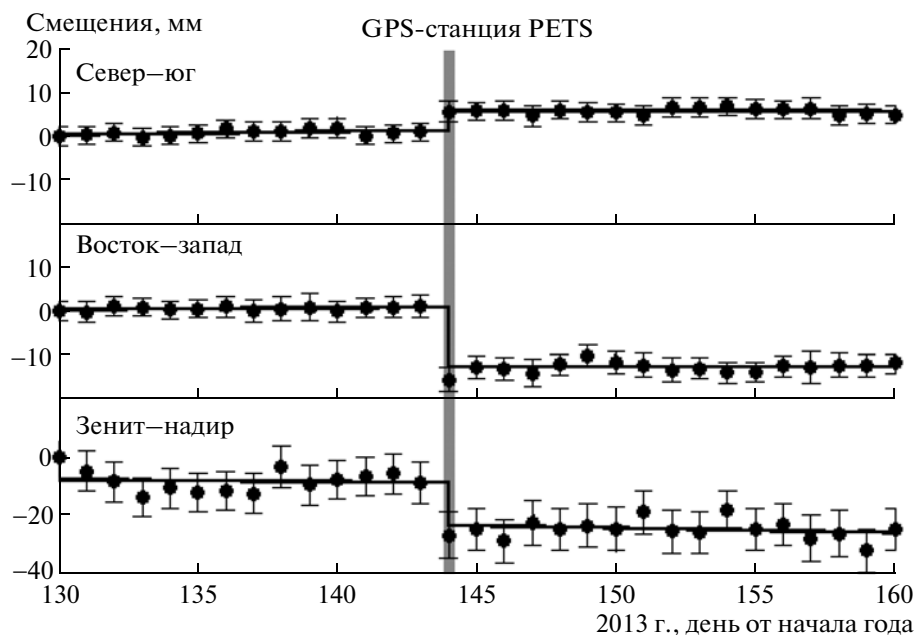


Рис. 2. Временные серии координат пункта IGS-сети PETS, г. Петропавловск-Камчатский, за 15 дней до и 17 после Охотоморского землетрясения. Серой вертикальной линией показана дата главного толчка $M_w = 8.3$.

дуги. Вертикальные подвижки (рис. 3б) наиболее выражены в данных GPS-наблюдений на п-ове Камчатка (опускание) и северной половине о. Сахалин (поднятие), а также на IGS-пункте MAG0. Анализ временных рядов GPS-станций за несколько месяцев после Охотоморского землетрясения не выявил заметных постсейсмических смещений, что может объясняться как большой глубиной очага землетрясения, так и физическими условиями в нем и/или свойствами Тихоокеанской литосферной плиты, в пределах которой локализован сейсморазрыв.

В режиме PPP (высокоточное точечное позиционирование) была выполнена математическая обработка двухчасовых фрагментов GPS-измерений с дискретностью записи 1 с, центрированных по времени относительно момента главного толчка. Она не зафиксировала значительных периодических колебаний в координатных компонентах станций, вызванных прохождением сейсмических волн, инициированных землетрясением. Предварительные расчеты изменения полного электронного содержания (ПЭС) по данным Камчатской GPS-сети, ближайшей к эпицентру землетрясения, не выявили косейсмических ионосферных возмущений, превышающих фоновые вариации ПЭС.

По данным о косейсмических смещениях в 27 пунктах GPS-наблюдений, расположенных на расстояниях 300–1100 км от эпицентра, и на основе имеющейся сейсмологической информации построена дислокационная модель очага Охотоморского землетрясения. Сейсморазрыв представлен единственной наклонной плоскостью с

однородным смещением (механизм очага – сброс). Моделирование выполнялось в два этапа. На первом этапе с использованием модификации метода максимального правдоподобия, предложенного в работе [9], в упругом полупространстве была решена задача поиска оптимальных параметров плоскости сейсморазрыва, минимизирующих различия между модельными и наблюдаемыми величинами косейсмических смещений. На втором этапе при помощи программы STATIC1D [10] оптимизировалось значение смещения в очаге с учетом сферичности и слоистости Земли (модель PREM). Ограничения на значения параметров модели и их априорные величины взяты из работы [11], оперирующей только телесеismicкими данными, и в соответствии с GCMT-решением (<http://www.globalcmt.org>). Была выполнена инверсия различных наборов 2D- и 3D-косейсмических смещений. Тестировались две альтернативные модели – с пологим и крутым падением плоскости сейсморазрыва.

Оптимальная модель очага получена инвертированием 3D-смещений на всех используемых GPS-пунктах и соответствует пологому падению плоскости сейсморазрыва. Параметры плоскости: географическое положение 55.480° с.ш., 153.768° в.д. (верхний северо-восточный край плоскости), размеры 180.52×65.00 км, глубина верхнего края плоскости 598.96 км, угол падения 10° (*), азимут 184° (*), направление смещения в очаге и его величина -93.75° и 3.3 м. Параметры, отмеченные знаком (*), ограничены их априорными величинами и не определялись. Соответ-

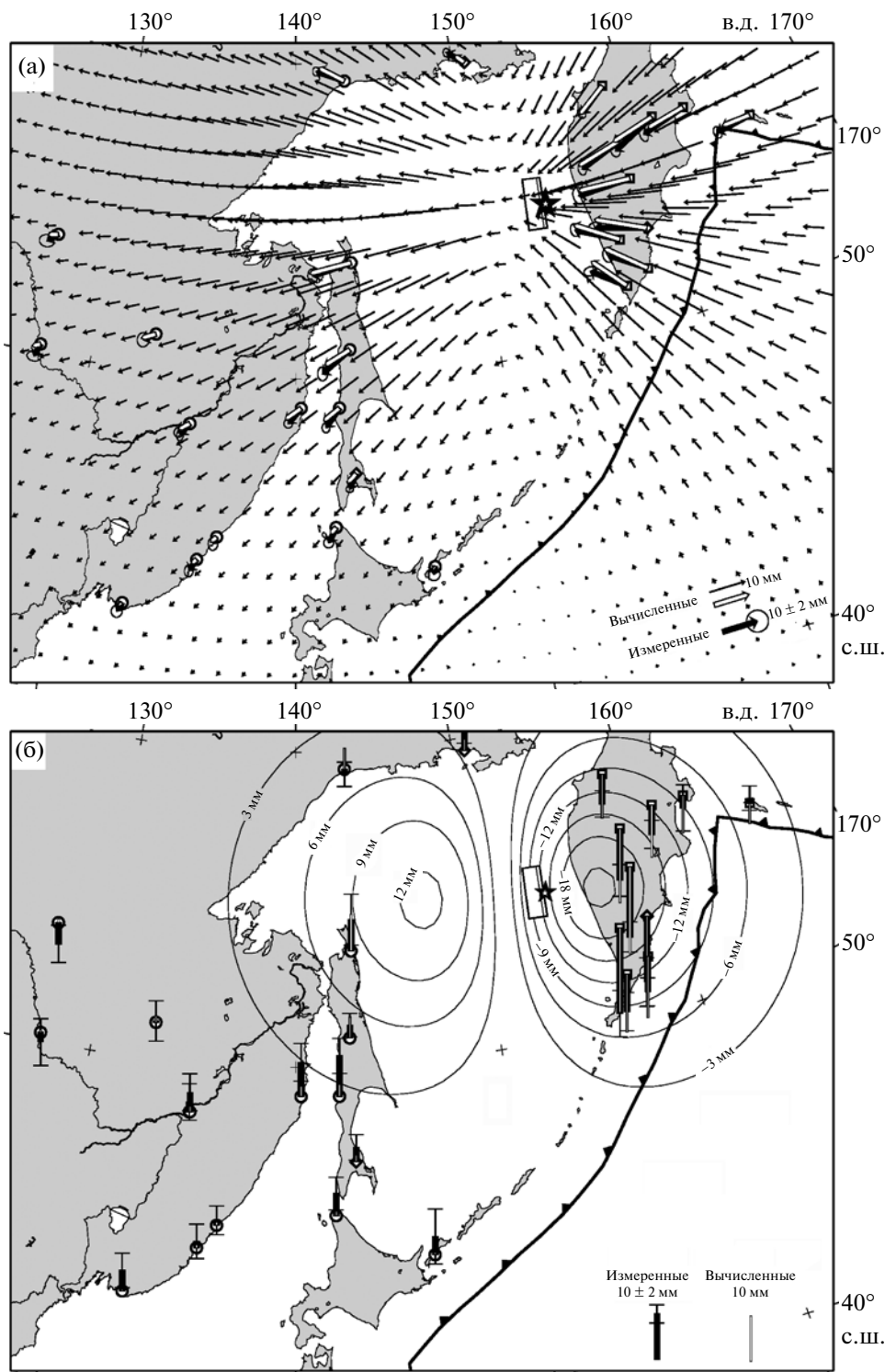


Рис. 3. Измеренные и вычисленные косейсмические смещения. На рис. 3а векторами показаны величины и направления горизонтальных подвижек с эллипсами среднеквадратических отклонений. На рис. 3б вертикальными столбиками и изолиниями, проведенными через 3 мм, даны амплитуды вертикальных смещений. Изолиниями показано поле вычисленных подвижек. Звездочкой обозначено положение эпицентра главного толчка $M_w = 8.3$. Прямоугольником изображена проекция модельной плоскости сейсморазрыва на поверхность Земли. Верхний край плоскости отмечен двойной чертой.

Таблица 1. Косейсмические смещения в пунктах непрерывных GPS-измерений и их среднеквадратические ошибки

Пункт	Широта	Долгота	Косейсмические смещения, мм			Среднеквадратические ошибки смещений, мм		
	градус		север—юг	восток—запад	зенит—надир	север—юг	восток—запад	зенит—надир
_ES1	55.930	158.697	-4.3	-12.4	-11.4	1.1	0.7	3.5
_KBG	56.258	162.711	-2.9	-12.9	-2.8	1.4	0.7	5.1
APCH	52.925	157.134	6.0	-11.2	-18.9	1.2	0.8	5.1
BRNG	55.194	165.984	-0.6	-10.0	1.1	1.1	0.7	2.7
KLUC	56.318	160.856	-5.4	-12.7	-6.5	1.1	0.8	3.1
PETS	53.023	158.650	4.5	-13.6	-14.5	1.0	1.2	5.4
PAUJ	51.469	156.815	6.6	-8.6	-8.3	0.8	1.2	4.2
MIL1	54.679	158.584	-0.2	-14.9	-15.5	1.6	1.0	3.3
TIGS	57.765	158.671	-5.5	-7.6	-6.6	0.9	0.7	2.9
VODO	51.809	158.077	6.7	-9.5	-7.8	1.3	0.9	3.1
MAG0	59.576	150.770	3.5	-4.4	4.3	0.8	0.6	2.7
OKHT	59.414	143.072	3.1	-7.7	-1.1	0.8	0.6	2.7
BLAG	50.257	127.521	-3.6	-1.2	-2.1	0.9	1.3	5.1
CHMN	51.137	133.041	-1.9	-3.4	0.3	1.3	1.1	4.4
ZEYA	53.753	127.252	-2.4	-2.8	-4.7	1.1	1.4	4.1
GEO0	48.473	135.052	-3.3	-2.4	2.2	1.0	0.6	4.0
KHAB	48.489	135.077	-2.7	-3.0	4.3	0.9	0.8	4.1
OKHB	53.602	142.946	-3.1	-10.8	6.9	1.3	0.9	5.6
TYMV	50.865	142.675	-6.2	-7.8	2.8	1.2	0.9	2.6
UGLG	49.076	142.065	-5.3	-3.9	8.9	0.9	0.7	3.8
VANB	49.091	140.255	-4.2	-3.6	7.5	0.8	0.8	4.1
TERN	45.062	136.601	-1.9	-0.9	1.1	1.2	0.9	3.2
SMHK	44.346	135.818	-3.3	-2.0	1.4	1.1	0.8	3.8
NKHG	42.838	132.899	-2.5	-1.2	4.5	1.1	1.0	3.8
YSSK	47.030	142.717	-4.2	-2.0	3.2	0.6	0.7	2.8
WAKK	45.403	141.750	-4.2	-2.2	4.9	0.9	0.9	3.6
KUNA	44.035	145.861	-2.2	-0.6	4.0	1.1	1.1	6.1

ствующие значения сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w равны $4.69 \cdot 10^{21}$ Н · м и 8.38, что весьма близко к результатам сейсмологических определений. Их величины получены для модуля сдвига среды $\mu = 121.2$ ГПа, вычисленного по модели PREM для глубины 605 км.

На рис. 3 показаны поля горизонтальных и вертикальных косейсмических смещений, рассчитанных с использованием оптимальной модели. Результаты моделирования удовлетворительно качественно и количественно объясняют наблюдаемые косейсмические смещения и накладывают ограничения на размеры очага землетрясения. Имеющиеся отклонения вычисленных и измеренных векторов подвижек, а также меньшая величина смеще-

ния в очаге по сравнению с моделью [11], в первую очередь, могут быть объяснены использованием упрощенной модели очага — наклонной плоскости с однородным смещением и выбранными физическими параметрами среды. Необходимо отметить, что близкое решение с незначительно большей невязкой получается на основе GCMT-решения и крутого падения плоскости сейсморазрыва (79°).

Таким образом, геодезические данные, как и сейсмологические измерения, не позволяют уверенно определить механизм очага для столь глубокого сейсмического события в отличие от сильных коровых землетрясений [12], хотя оптимальная модель соответствует положому залеганию плоскости сейсморазрыва. Результаты исследования косей-

смических движений земной коры, вызванных Охотоморским землетрясением, позволяют предположить, что такие смещения сопровождаются и другие глубокофокусные сейсмические события, сопоставимые по магнитуде и механизму очага. Примером может служить землетрясение в Боливии 09.06.1994 г. ($H = 647$ км, $M_w = 8.2$). Результаты изучения методами GPS-геодезии крупнейших землетрясений последнего десятилетия ($M_w = 8.8-9.1$) и полученные в данном исследовании наглядно демонстрируют, что заметный вклад в динамику деформаций земной коры вносит даже в сейсмически “спокойных” регионах вносят косейсмические эффекты, в том числе сопровождающие глубокофокусные сейсмические события.

Таким образом, по данным непрерывных GPS-наблюдений определено поле косейсмических смещений земной коры, вызванных мощным глубокофокусным Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г. На основе полученных результатов и имеющейся сейсмологической информации построена дислокационная модель очага этого уникального сейсмического события.

Авторы глубоко признательны Н.П. Переваловой за помощь в получении и анализе вариаций ПЭС, С.А. Антипину и ООО “НПИГТР”, г. Находка, за предоставленные данные GPS-станции НКНГ. Для построения рисунков использовался программный пакет GMT.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-92101ЯФ), ДВО РАН (проекты 12-III-A-08-186, 12-I-P4-07, 12-I-ОНИТ-02),

ЦКП ДВО РАН “Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. В. 21. С. 17–24.
2. Иванова Е.И., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Чеброва А.Ю. В сб.: Материалы IV науч.-техн. конф. “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 157–162.
3. Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А. и др. // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83–93.
4. Левин В.Е. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 60–70.
5. Shestakov N.V., Takahashi H., Ohzono M., et al. // Tectonophysics. 2012. V. 524–525C. P. 76–86.
6. Wdowinski S., Bock Y., Zhang J., et al. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № B8. P. 18057–18070.
7. Freymueller J.T., Steblov G.M., Kogan M.G., et al. // AGU2013 abstracts. 2013. G41A-0923.
8. Steblov G.M., Kogan M.G., Freymueller J.T., et al. // AGU2013 abstracts. 2013. G23B-0782.
9. Matsu'ura M., Hasegawa Y. // Phys. Earth and Planet. Interiors. 1987. V. 47. P. 179–187.
10. Pollitz F. // Geophys. J. Intern. 1996. V. 125. P. 1–14.
11. Ye L., Lay T., Kanamori H., Koper K.D. // Science. 2013. V. 341. P. 1380–1384.
12. Gordeev E.I., Gusev A.A., Levin V.E., et al. // Geophys. J. Intern. 2001. V. 147. P. 189–198.