ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 496, № 2, с. 184–188

———— СЕЙСМОЛОГИЯ ———

УДК 550.3

НАБЛЮДЕНИЕ В МОСКВЕ НАКЛОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ХОДЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 12 НОЯБРЯ 2017 г. НА ИРАНО-ИРАКСКОЙ ГРАНИЦЕ

© 2021 г. И. М. Алёшин^{1,*}, С. Д. Иванов¹, Ф. В. Передерин¹, Г. М. Стеблов¹, К. И. Холодков¹, И. А. Широков¹

> Представил академик РАН А.О. Глико 15.11.2020 г. Поступило 15.11.2020 г. После доработки 15.11.2020 г. Принято к публикации 17.11.2020 г.

Представлено описание наблюдения остаточного наклона, вызванного удаленным землетрясением. Результаты статического и динамического моделирования события согласуются с измеренными значениями. Обсуждаются условия, при которых возможно наблюдать остаточные деформации телесейсмических событий и перспективы применения наклономерной сети для мониторинга сейсмоактивных районов.

Ключевые слова: остаточный наклон, лапласово смещение, наклономер **DOI:** 10.31857/S2686739721020031

Первые наблюдения остаточного смещения, вызванного удаленным землетрясением, описаны в середине прошлого века. В работах [1–3] измерения велись на наклономерах. Пресс [4] наблюдал на Гавайях остаточную деформацию, вызванную землетрясением на Аляске. Так как помимо наклономеров использовался деформограф, то кроме остаточного наклона была зафиксирована также остаточная деформация. Для интерпретации наблюдений были использованы формулы для статической функции Грина полупространства, полученные в работах [5, 6] на основе дислокационной модели очага землетрясения [7].

Наиболее полное и всестороннее изучение процессов формирования остаточных смещений на основе дислокационной теории очага [7] выполнено Грайзером. В статье [8] было продемонстрировано, что форма возмущения в *P*-волне представляет собой суперпозицию квазипериодического сигнала и ступенчатого смещения U_{P0} . Аналогично, в *S*-волне также имеется постоянная составляющая U_{S0} . Кроме того, перед вступлением поперечной волны отмечается одностороннее длиннопериодное движение U_L (согласно введенному Г.А. Гамбурцевым в работе [9] понятию "лапласово смещение").

С удалением от очага величина постоянного смещения затухает обратно пропорционально квадрату расстояния [8]. Кроме того, эффект может быть замаскирован длиннопериодными возмущениями, например, фазой W [10]. Поэтому для экспериментального наблюдения остаточного смещения на телесейсмических расстояниях необходимо одновременное выполнение ряда условий. Во-первых, запись должна вестись устройством с достаточно хорошей разрешающей способностью. Во-вторых, регистрировать следует именно компоненты смещения, а не их производные по времени. В-третьих, землетрясение должно быть достаточно сильным, при этом ориентация нодальных плоскостей по простиранию на земной поверхности должна значимо отличаться от направления из эпицентра на пункт регистрации. В совокупности одновременное соблюдение приведенных условий существенно повышает возможность экспериментального наблюдения остаточного смешения на телесейсмических расстояниях. Ниже рассмотрено проявление одного из таких редких событий: наблюдения в Москве остаточного смещения, вызванного землетрясением магнитудой Mw = 7, произошедшего 12 ноября 2017 г. вблизи ирано-иракской границы.

На рис. 1 показаны записи иракского землетрясения, произошедшего 12 ноября 2017 г. вблизи города Халабия, Ирак. Согласно каталогу Гео-

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия *e-mail: ima@ifz.ru



Рис. 1. Запись иракского землетрясения, 12 ноября 2017 г., на наклономерах НШ-11 (вверху) и НШ-12 (внизу). Время отсчитывается от вступления *P*-волны. *N* и *E* – компоненты наклона север—юг и восток—запад; *P*, *S* и *R* – вступления объемных телесейсмических волн и поверхностная волна Рэлея.

логической службы США¹ (*USGS*) магнитуда землетрясения составила 7.3, координаты эпицентра – 34.911° с.ш., 45.959° в.д., глубина – 19 км. Эпицентральное расстояние от пункта наблюдения в г. Москве равно приблизительно 21.6 град (≈2400 км). Тип смещения в очаге – чистый взброс.

Регистрация велась двумя высокочувствительными наклономерами серии НШ (наклономер штольневый). Приборы установлены на заглубленных постаментах в специально оборудованном подвальном помещении Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН [11]. Наклономеры этой серии разработаны в Особом конструкторском бюро ИФЗ АН СССР и к моменту их создания (середина 1990-х годов) обладали уникальными характеристиками. Текущий установленный диапазон измеряемых наклонов составляет $\pm 1 \times 10^{-4}$ рад с погрешностью 5 × 10⁻¹⁰ рад (один из двух диапазонов, в которых работает прибор с различной точностью). Диапазон измеряемых частот составляет от 0 до 0.005 Гц, дрейф нуля – 2.4×10^{-6} рад. В конце 2016 г. для этих наклономеров была реализована современная система регистрации [11], которая, помимо прочего, включает ведение архива измерений в формате *miniSEED* и обеспечения доступа к файлам по протоколу *HTTP*².

Оба наклономера отчетливо зафиксировали основные телесейсмические фазы: продольную *P*, поперечную *S* и рэлеевскую *R*. Кроме того, на записях обоих приборов присутствует постоянная составляющая. Однако, несмотря на сходство, записи НШ-11 и НШ-12 содержат ряд существенных отличий. Во-первых, между вступлениями волн *P* и *S* на обеих компонентах НШ-11 присутствует сильное периодическое возмущение. На записях НШ-12 такого сигнала нет. Во-вторых, по графикам видно, что величина N-компоненты постоянного наклона НШ-11 положительна, а НШ-12 — отрицательна. Наконец, модуль постоянного смещения, рассчитанного по записям наклономера НШ-11, многократно превыша-

¹ Адрес ссылки на метаданные события https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000bmcg/executive

 $^{^2}$ Архив доступен по адресу: http://data.ifz.ru/data/IPE-NSH

АЛЁШИН и др.

	U_E , см	<i>U_N</i> , см	<i>U_Z</i> , см	α_E , рад	α _{<i>N</i>} , рад	λ, град
Ι	-0.20×10^{-3}	-0.17×10^{-3}	-0.20×10^{-3}	-0.22×10^{-9}	-0.2×10^{-9}	310
Π	-0.23×10^{-3}	-0.22×10^{-3}	-0.22×10^{-3}	-0.40×10^{-9}	-0.07×10^{-9}	314

Таблица 1. Компоненты смещения (U) и углов наклона (α), рассчитанных по параметрам очага ирано-иракского землетрясения. В последней колонке приведены азимуты плоскости наклона (λ)

ет соответствующую величину, зафиксированную прибором НШ-12.

Последующие оценки показали, что ни большие значения постоянного наклона, ни указанные выше периодические возмущения, зафиксированные НШ-11, не согласуются с модельными расчетами. Наиболее вероятная причина этих эффектов — электромагнитная помеха в цепи регистрации этого устройства. Поэтому в дальнейшем обсуждении мы будем опираться только на данные прибора НШ-12.

В табл. 1 представлены величины остаточных смещений и углов наклона, рассчитанных по конечной модели очага для каждой из нодальных плоскостей, согласно фокальному механизму рассматриваемого землетрясения из каталога USGS. Расчет был выполнен для модели *PREM* [12] методом, описанным в работе [13]. Отметим, что проекция наклона на ось E положительна, а на ось N — отрицательна, что согласуется с записями наклономера HШ-12 (рис. 1). Абсолютные величины проекций согласуются по порядку величины с теоретическими значениями.

Азимут плоскости остаточного наклона λ , определенный по модельным смещениям, составил приблизительно $\lambda \approx 310^{\circ}$ (см. табл. 1), что также согласуется с измеренным значением этого угла (он оказался равным приблизительно 320°). На рис. 2 показаны компоненты смещения, рассчитанные по механизму очага рассматриваемого события (согласно данным USGS) и развернутые на угол λ . Вычисления проводились с помощью библиотеки *Instaseis*, с использованием модели



Рис. 2. SYN — синтетические сейсмограммы, компоненты смещения на горизонтальные оси, в системе координат, развернутой вокруг вертикальной оси на угол λ . Для удобства сравнения с записями наклона знак компонент изменен на противоположный. Для иллюстрации присутствия остаточного смещения на вставке изображена та же *R*-компонента, но в увеличенном масштабе. НШ-12 — запись наклономера НШ-12 после низкочастотной фильтрации (20 с) и разворота на тот же угол. В такой системе координат постоянное смещение присутствует только на компоненте *R*.

186

187

PREM 20³ [14]. Исходные сейсмограммы были пересчитаны в систему координат (R, T) поворотом на угол λ . Ось *R* образована проекцией смещения на горизонтальное сечение плоскости наклона, ось *Т* перпендикулярна к *R* и вертикали. На этом же рисунке приведены зарегистрированные компоненты наклона после разворота на тот же угол λ . Остаточное смещение на *R*-компоненте в этом случае достигает максимальной величины (полного наклона), на Т-компоненте остаточное смещение не отмечается.

Возможность регистрации статического смещения на значительном по величине эпицентральном расстоянии, превышающем 2000 км, стало результатом благоприятного сочетания ряда факторов: во-первых, высокая магнитуда сейсмического события и мелкофокусный очаг; вовторых, фокальный механизм, соответствующий чистому взбросу, наиболее эффективно проявляющийся в виде наклонных деформаций сплошной срелы: в-третьих. амплитулно-частотные характеристики прибора, позволяющие фиксировать крайне малые относительные смещения подстилающих слоев земной поверхности.

В отношении чувствительности наклономерных измерений следует заметить, что погрешность измерений для использованных приборов составила, примерно, 0.1 максимальной амплитуды колебательного процесса и сопоставима по порялку величины с остаточным смешением. В то же время точность смещений земной поверхности, регистрируемая спутниковыми геодезическими методами, ограничена величиной порядка 1 мм, так что величина ожидаемого сигнала для рассмотренного события составила бы. примерно, 0.001 от погрешности таких наблюдений. Кроме того, заметное преимущество наклономерных измерений по сравнению с сейсмометрией состоит в частотной характеристике наклономеров, которая практически не ограничена в низкочастотной области, что позволяет уверенно регистрировать остаточные смещения. При этом схожие по частотной характеристике деформографы представляют собой весьма громоздкие установки, требующие значительных усилий по обслуживанию и эксплуатации.

Указанные сопоставления говорят о перспективности развития сети наклономерных наблюдений, возможно, с меньшей чувствительностью, вблизи сейсмоопасных регионов, в пределах от нескольких сотен до тысячи километров от возможных очаговых зон.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Nishimura E. On Some Destructive Earthquakes Observed with the Tiltmeter at a Great Distance (Study on Some Phenomena Foretelling the Occurrence of Destructive Earthquakes) // Bulletins - Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. 1953. V. 6. P. 1-15.
- 2. Tomaschek R. Earth Tilts in the British Isles Connected with Far Distant Earthquakes // Nature. 1955. V. 176. P. 24–25.
- 3. Бончковский В.Ф. Деформации земной поверхности, сопровождающие некоторые катастрофические, далекие землетрясения // Известия Академии наук СССР. Серия геофизическая. 1962. № 2. C. 190-193.
- 4. Press F. Displacements, Strains, and Tilts at Teleseismic Distances // Journal of Geophysical Research. 1965. № 10. V. 70. P. 2395–2412.
- 5. *Chinnerv M.A.* The Deformation of the Ground around Surface Faults // Bulletin of the Seismological Society of America. 1961. № 3. V. 51. P. 355-372.
- 6. Maruyama T. Statical Elastic Dislocations in an Infinite and Semi-infinite Medium // Bulletin of the Earthquake Prevention Research Institute of the University of Tokyo, 1964.
- 7. Введенская А.В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. № 3. С. 277-284.
- 8. Грайзер В.М., Шебалин Н.В. Волновое поле вблизи разрыва и оценка параметров источника // Доклады Академии наук СССР. 1983. № 3. Т. 268. С. 579-583.
- 9. Гамбурцев Г.А. О волнах, вызванных движущимся источником в твердой упругой среде // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1946. № 1. Т. 10. С. 31-43.
- 10. Kanamori H. W phase // Geophysical Research Letters. 1993. № 16. V. 20. P. 1691–1694.
- 11. Алешин И.М., Иванов С.Д., Корягин В.Н., Кузьмин Ю.О., Передерин Ф.В., Широков И.А., Фаттахов Е.А. Оперативная публикация данных наклономеров серии НШ на основе протокола SeedLink // Сейсмические приборы. 2017. № 3. Т. 53. С. 31-41. https://doi.org/10.21455/si2017.3-3
- 12. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary Reference Earth Model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1981. V. 25. № 4. P. 297-356.
- 13. Pollitz F.F. Coseismic Deformation from Earthquake Faulting on a Layered Spherical Earth // Geophys. J. Int. 1996. V. 125. P. 1-14.
- 14. van Driel M., Krischer L., Stähler S.C., Hosseini K., Nissen-Meyer T. Instaseis: Instant Global Seismograms Based on a Broadband Waveform Database // Solid Earth. 2015. V. 6. P. 701-717. https://doi.org/10.5194/se-6-701-2015

³ Для расчета использовались данные PREM 20, представленные на сайте проекта Instaseis: https://instaseis.net

OBSERVATION OF TILT DEFORMATIONS IN MOSCOW AFTER NOVEMBER 12, 2017 IRAN-IRAQ EARTHQUAKE

I. M. Aleshin^{*a*,#}, S. D. Ivanov^{*a*}, F. V. Perederin^{*a*}, G. M. Steblov^{*a*}, K. I. Kholodkov^{*a*}, and I. A. Shirokov^{*a*}

^a Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation [#]e-mail: ima@ifz.ru

Presented by Academician of the RAS A.O. Gliko November 15, 2020

In this article we describe the observation of residual tilt after a teleseismic earthquake. We tested static and dynamic models and both agree very well with the observation. Discussion includes conditions that make observations of residual deformations of teleseismic events possible and the prospects for using the tiltmeter network for monitoring seismically active regions.

Keywords: residual tilt, Laplace shift, tiltmeter, inclinometer