

УДК 551.466.62(282.256.341)

ГЕНЕРАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ УДАЛЕННЫМИ СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

© 2014 г. Н. Г. Гранин, Н. А. Радзиминович, К. М. Кучер, В. В. Чечельницкий

Представлено академиком М.А. Грачевым 11.12.2012 г.

Поступило 24.12.2012 г.

DOI: 10.7868/S0869565214080180

Примеры колебаний уровня водоемов, включая плавательные бассейны, после сильных землетрясений, произошедших на значительном расстоянии, хорошо известны (см., [например, 1–7]). При этом инструментальных измерений изменений уровня недостаточно, так как системы регистрации приливов в морях и океанах и сейшевых колебаний уровня озер для фильтрации ветровых волн имеют постоянную времени несколько минут. Это не позволяет фиксировать изменения уровня с меньшими периодами и, как следствие, достаточно высокочастотные колебания уровня, генерируемые землетрясениями, отфильтровываются.

Наблюдения за уровнем оз. Байкал ранее проводились поплавковым регистратором “Валдай” с использованием колодца, который в подледный период поддерживался незамерзшим и в течение всего года фильтровал высокочастотные изменения уровня. В настоящее время (начиная с 2010 г.) осуществляется регистрация гидростатического давления. Постоянная времени измерительной системы летом составляет около 150 с, а в подледный период близка к нулю, так как верхняя часть колодца замерзает, отсутствует переток воды, а давление передается мгновенно. Таким образом, после 2010 г. в зимний период мы получили возможность регистрировать высокочастотные колебания уровня. Временная синхронизация регистрации уровня осуществляется GPS-приемником с точностью до 1 мкс. Сигнал с датчика давления оцифровывается с частотой 26 Гц. С 2011 г., когда мы обнаружили отклик уровня озера на Японское землетрясение, запись отсчетов производится каждую секунду; до этого дискретность записи со-

ставляла 10 с. Точность измерения уровня составляет 0.5 мм, разрешающая способность 0.1 мм [8].

Сезонные изменения уровня оз. Байкал не превышают 1 м. Максимальный уровень наблюдается в сентябре–октябре, минимальный в апреле–мае. На Байкале наблюдаются периодические изменения уровня, обусловленные стоячими волнами – сейшами. Периоды сейш составляют: 277 мин для одноузловой сейши, 152 мин для двухузловой, 84 мин для трехузловой и 59 мин для четырехузловой [8, 9]. Период поперечной сейши, определенный по формуле Мерриана, для района измерений (п. Листвянка) согласуется с экспериментальными данными [9] и составляет примерно 11 мин. Наибольшую амплитуду имеет одноузловая сейша. По нашим данным, полученным с июня 2010 по июнь 2011 г., среднегодовая амплитуда одноузловой сейши составляет 1.1 см при максимальном значении 3.5 см [9].

Пункт измерения уровня расположен на западном берегу Байкала в поселке Листвянка. Здесь также находится сейсмостанция LSTR региональной сети Байкальского филиала ГС РАН. Сейсмостанция оборудована короткопериодными сейсмометрами CM-3KM, регистрирующими скорости колебаний, а также трехкомпонентным широкополосным акселерометром Geotek CMG-5T(B). Интервал дискретизации 0.01 с. Датчики установлены на специальном бетонном постаменте на гранитном скальном основании в подвале Байкальского музея. Кроме данных сейсмостанции LSTR для анализа использовались данные сейсмостанции TLY, которая находится в 5 км от южной оконечности оз. Байкал в пади Талая и входит в систему глобальных сейсмических наблюдений (GSN). На этой станции установлены трехкомпонентная система Streckeisen Model STS-1/VBB для широкополосных, длиннопериодных и сильно длиннопериодных каналов и сейсмометр Teledyne Geotech Model GS-13 для триггерных короткопериодных каналов. Регистрация ведется в диапазоне периодов 0.04–360 с. Частота опроса 100, 20, 1 и 0.1 отсчетов в секунду соответ-

*Лимнологический институт Сибирского отделения
Российской Академии наук, Иркутск*

*Институт земной коры Сибирского отделения
Российской Академии наук, Иркутск*

*Байкальский филиал Геофизической службы
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск*

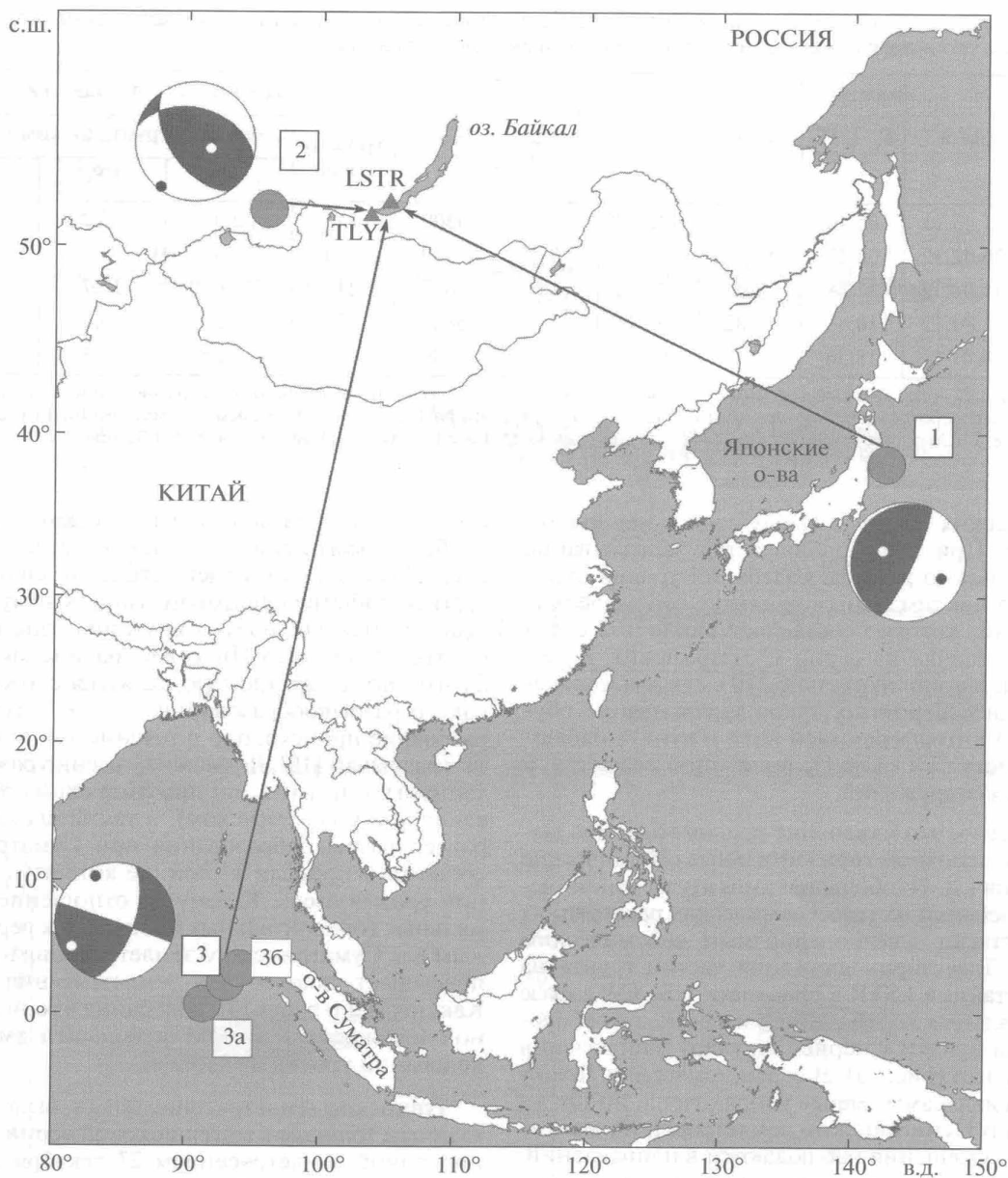


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений (сейсмостанций LSTR и TLY и урнемерного поста LSTR) и эпицентров рассматриваемых землетрясений. Номера землетрясений соответствуют номерам в табл. 1. Рядом с эпицентрами приведены механизмы очагов землетрясений (best double-couple) из решений тензора момента центраида [Global CMT Project www.globalcmt.org].

ственно для короткопериодных широкополосных, длиннопериодных и очень длиннопериодных каналов.

В течение ледового периода 2011 и 2012 гг. был зарегистрирован отклик уровня оз. Байкал на несколько сильных землетрясений: землетрясение Тохоку (Япония) 2011 г., Тувинское 2012 г. и Суматринские события 2012 г. (рис. 1, табл. 1). После данных землетрясений наблюдались квазипериодические колебания уровня с периодами от 1 до

2 мин, что значительно меньше периодов поперечных и, тем более, продольных сейш.

Видимое начало колебаний уровня озера после удаленных (Японского и Суматринских) землетрясений соответствует времени прихода поперечных S-волн. Колебания от более высокочастотных, но менее интенсивных продольных волн не проявились на фоне естественных колебаний уровня воды. Наибольшие по амплитуде колебания уровня озера отмечаются после прохождения

Таблица 1. Характеристики анализируемых землетрясений и величины максимальных колебаний уровня озера (по данным уровнемера) и смещений грунта (по данным сейсмостанции)

№	Дата	T_0 , UTC	с.ш.	в.д.	M_w	D , км	Двойная амплитуда, мм			
							Уровень озера	Смещения грунта по компонентам		
								Z	EW	NS
1	11.03.11	05:46	38.3°	142.47°	9.1	3300	150	32.6	30.2	57.8
2	26.02.12	06:17	51.73	95.92	6.7	600	10	5.5	3.7	14.7
3	11.04.12	08:38	2.3	93.06	8.6	5600	240	4.6	15.7	5.3
3а	11.04.12	10:43	0.82	92.46	8.2	5800	70	3.2	5.8	3.5
3б	10.01.12	18:36	2.43	93.21	7.2	5600	6	0.25	1.1	0.2

Примечание. T_0 – время в очаге (ч:мин); M_w – моментная магнитуда; D – эпицентрального расстояние. Записи смещений получены из акселерограмм сейсмостанции LSTR для землетрясений № 1, 3, 3а и велосигамм сейсмостанции TLY для землетрясений № 2 и 3б соответственно двойным и одинарным численным интегрированием во временной области.

сейсмических поверхностных волн с периодами 40–50 с. При этом наблюдается запаздывание максимального размаха колебаний уровня относительно максимальных амплитуд сейсмических колебаний, которое составляет около 102 с для главного толчка из серии Суматринских землетрясений и приблизительно 220 с для землетрясения Тохоку. Вероятно, такое запаздывание обусловлено интерференцией волн в пункте наблюдения (порт Листвянка), вызванной геометрией портовых сооружений.

Известно, что изменение уровня водоемов вызывают в основном горизонтальные сейсмические смещения [3]. Наибольшие амплитуды сейсмических колебаний на телесеизмических расстояниях соответствуют длиннопериодным сейсмическим волнам. Траектории движения частиц грунта на сейсмостанции LSTR в плоскости NS–EW в фазе максимальных колебаний Суматринского землетрясения близки к перпендикулярному направлению на эпицентр (рис. 3а). Для землетрясения Тохоку фазовая диаграмма менее упорядочена, но так же как и при Суматринском землетрясении, максимальные смещения наблюдаются в направлении, близком к перпендикулярному направлению распространения волны (рис. 3б). Этим объясняется распределение максимальных значений смещений грунта по соответствующим компонентам (табл. 1).

Особый интерес вызывает тот факт, что максимальный размах колебаний уровня озера (около 24 см) зафиксирован для Суматринского землетрясения (рис. 2), несмотря на то, что оно было слабее землетрясения Тохоку и произошло на гораздо большем расстоянии от Байкала. Следует отметить, что землетрясение Тохоку – типичное меганадвиговое землетрясение, произошедшее в пределах Японского тренча, в зоне субдукции Тихоокеанской плиты под Охотскую. Суматринское землетрясение 2012 г., хотя и характеризуется не-

сколько меньшей по сравнению с землетрясением Тохоку магнитудой, однако является уникальным. На сегодняшний день это самое сильное известное событие сдвигового типа, к тому же оно было не межплитным, а внутриплитным с эпицентром в пределах Индо-Австралийской плиты. Другой его особенностью является сложный характер разрывообразования в очаге. Разрывообразование происходило в течение 160 с по четырем разрывам [10]. Возможно, именно разные механизмы очагов (надвиг при Японском событии и сдвиг при Суматринском), а также сложный характер разрывообразования при Суматринском событии и привели к разнице амплитуд колебаний уровня озера. К тому же отношение максимальных горизонтальных смещений к вертикальным для Суматринского землетрясения в два раза превышает таковое для землетрясения Тохоку. Как показано ранее [3], колебания в горизонтальной плоскости приводят к большей амплитуде колебаний уровня в водоеме.

Тувинское землетрясение 2012 г. было вторым главным толчком в афтершоковой серии, инициированной землетрясением 27 декабря 2011 г. с $M_w = 6.7$. Первое событие имело механизм очага сдвигового типа, но, к сожалению, оно произошло в период открытой воды на Байкале, и изменения уровня озера для него не были зафиксированы. Второй толчок аналогичной силы характеризовался другим фокальным решением – взбросового типа. В отличие от рассмотренных удаленных землетрясений Тувинское землетрясение произошло относительно близко от Байкала, и время начала колебаний уровня озера совпадает с приходом Р-волны. Наибольшее смещение грунта при Тувинском толчке наблюдалось по компоненте NS. При данном эпицентрального расстоянии происходит наложение поперечных S-волн и короткопериодных (около 10 с) поверхностных волн [11]; длиннопериодные поверхностные вол-

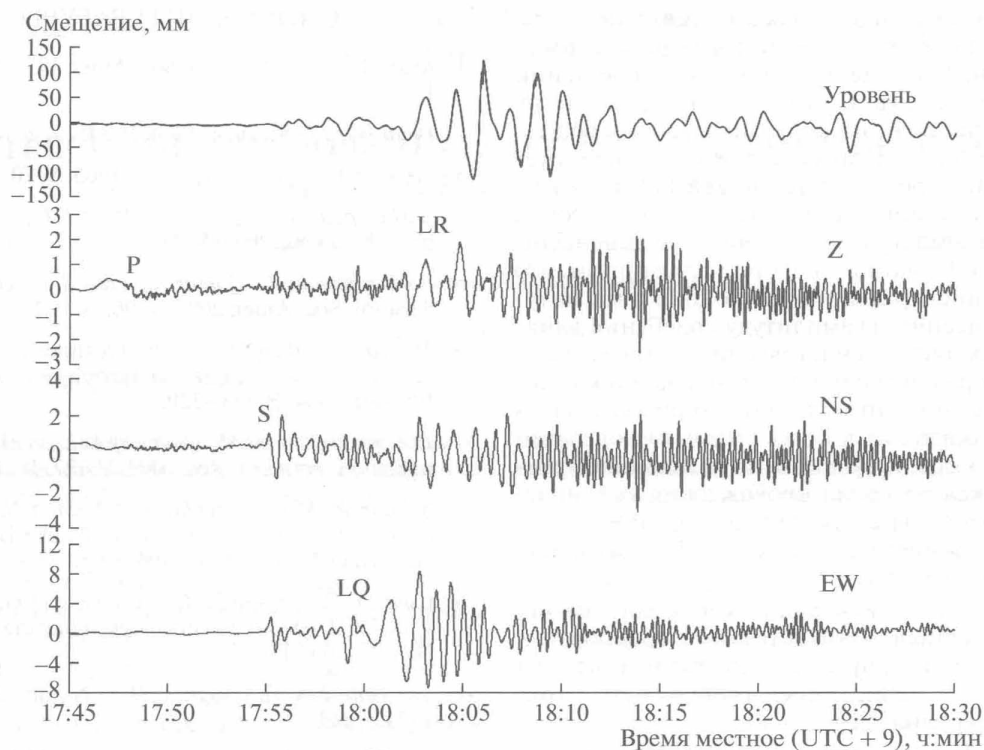


Рис. 2. Колебания уровня озера и колебания грунта на сейсмостанции LSTR при Суматринском землетрясении с $M_w = 8.6$ 11 апреля 2012 г.

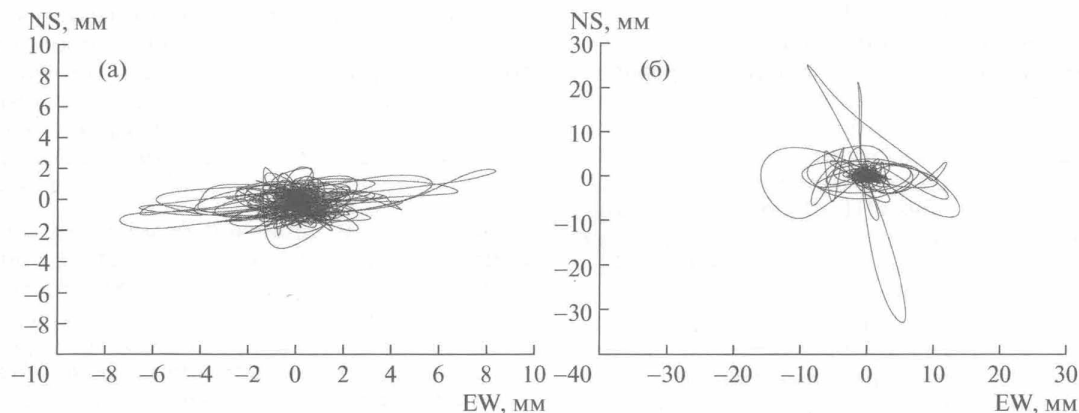


Рис. 3. Траектории смещений грунта в горизонтальной плоскости при Суматринском землетрясении с $M_w = 8.6$ (а) и землетрясении Тохоку с $M_w = 9.1$ (б).

ны, которые имеют максимальные амплитуды для далеких сильных событий, не успели выйти на поверхность.

Следует отметить, что для удаленных землетрясений наблюдается значительное (до 15 раз) превышение амплитуды колебаний уровня озера над колебаниями грунта. Объяснением этого факта может служить эффект усиления сейсмиче-

ских колебаний в осадочной толще озера. Данный эффект наблюдался и был смоделирован для колебаний уровня оз. Юнион в США, вызванных прохождением волн от землетрясения Денали 2002 г. с $M_w = 7.9$ [4, 5]. Для Тувинского события такого превышения не наблюдается (табл. 1).

Эффект влияния при прохождении сейсмических волн от сильнейших землетрясений на уро-

вень воды в скважинах на расстояниях в несколько тысяч километров хорошо известен и задокументирован. Приведенные в данном сообщении примеры показывают, что влияние проходящих сейсмических волн на колебания уровня воды в открытых водоемах также значимо и генерируемые вариации уровня превышают амплитуду сейшевых колебаний. Различный отклик уровня Байкала на землетрясения, произошедшие вблизи Японии и Суматры, свидетельствует о том, что помимо эпицентрального расстояния и магнитуды землетрясений на амплитуду колебаний влияет механизм очага землетрясения, вернее, соотношение горизонтальной и вертикальной компонент смещений. Преобладание горизонтальных смещений приводит к более сильным колебаниям уровня озера. Результаты по изменению уровня оз. Байкал во время прохождения сейсмических волн от сильных удаленных и региональных (Тувинское землетрясение) сейсмических событий получены впервые.

Продолжение наблюдений и накопление подобного материала позволит более обоснованно объяснить регистрируемые явления и создать адекватные модели, описывающие генерацию колебаний уровня озера.

Работа проведена при поддержке Междисциплинарных проектов СО РАН 73, 132 и проекта Президиума РАН 23.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kvale A.* // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1955. V. 45. P. 93–113.
2. *Donn W.L.* // Science. 1964. V. 145. P. 261–262.
3. *McGarr A.* // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 847–854.
4. *Barberopoulou A., Qamar A., Pratt T.L., et al.* // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31.
5. *Barberopoulou A., Qamar A., Pratt T.L., et al.* // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2006. V. 96. № 2. P. 519–535.
6. *Manga M., Wang C.-Y.* In: Earthquake Seismology. V. 4. Ch. 4.10. Treatise on Geophysics. Amsterdam: Elsevier, 2004. P. 293–320.
7. *Roeloffs EA, Sneed M., Galloway D.L., et al.* // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2003. V. 127. P. 269–303.
8. *Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P.* Physical Limnology of Lake Baikal: a Review. Irkutsk: Okayama, 1994. 80 p.
9. *Смирнов С.В., Кучер К.М., Гранин Н.Г., Стурова И.В.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 105–116.
10. *Yue Han, Lay Th., Koper K.D.* // Nature. 2012. V. 490. P. 245–249.
11. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice / P. Bormann. Ed. Potsdam: GeoForschungs Zentrum, 2002. V. 1. P. 1252.