

УДК 550.348.436+550.344.42

О ВОЗМОЖНОСТИ ЦУНАМИ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

© 2012 г. А. В. Ключевский, В. М. Демьянович, А. А. Ключевская

Представлено академиком Г.С. Голицыным 17.08.2011 г.

Поступило 08.08.2011 г.

На основе общеземной природы формирования цунами отмечено, что оно является атрибутом сейсмоопасных областей и регионов, граничащих с большими водоемами. Рассмотрены основные предпосылки и возможности явления цунами на оз. Байкал: информация о землетрясениях Байкальской впадины за инструментально-исторический период (1724–2011 гг.) обобщена в карте эпицентров толчков с магнитудой $M \geq 5$ и гистограммах распределения чисел толчков по магнитуде. Показано, что формирование волн цунами на Байкале начинается при землетрясениях с магнитудой $M \approx 5$, но из-за отсутствия системы мониторинга цунами на Байкале может наблюдаться только при сильнейших землетрясениях с $M > 7$. В качестве примера приведено катастрофическое Цаганское землетрясение (1861 г., $M \approx 7.5$), произошедшее у восточного побережья оз. Байкал и вызвавшее цунами с человеческими жертвами.

Цунами (япон. — большая волна в гавани) — морские волны очень большой длины, возникающие в результате сдвига вверх или вниз протяженных участков дна при сильных подводных и прибрежных землетрясениях и изредка вследствие вулканических извержений и других тектонических процессов [1]. В силу малой сжимаемости воды при быстром перемещении участков дна опирающийся на них столб воды смещается, не успевая растечься, в результате чего на поверхности водоема образуется некоторое возвышение или понижение. Этот столб воды формирует возмущение и колебательные движения толщ воды — волны цунами, распространяющиеся с большой скоростью (от 50 до 1000 км/ч), пропорциональной корню квадратному из глубины водоема. В области возникновения высота волн изменяется в пределах 0.01–5 м, но на побережье высота волн может достигать 10 м, а в неблагоприятных

по рельефу участках (клинообразных бухтах, долинах рек и т.д.) превышать 50 м.

Известно около 1000 случаев цунами, из них более 100 с катастрофическими последствиями. Примерно 80% цунами возникают на побережье Тихого океана, где наиболее часты катастрофические землетрясения. Так, 4 ноября 1952 г. в океане недалеко от южной оконечности Камчатского полуострова произошло землетрясение с магнитудой $M \approx 9$. Образовавшееся цунами практически полностью разрушило г. Северо-Курильск и привело к гибели более 2 000 человек. 26 декабря 2004 г. в Индийском океане произошло землетрясение с моментной магнитудой $M_w = 9.3$, гипоцентр которого определен вблизи северной оконечности острова Суматра. В результате этого землетрясения и цунами погибло более 300 тысяч человек. При катастрофическом Восточно-Японском землетрясении (11.03.2011 г., 05–46–23 UTC, $M_w = 9.0$, $\varphi = 38.32^\circ$ с.ш., $\lambda = 142.37^\circ$ в.д., $H = 32$ км) возникли волны цунами, обрушившиеся на восточное побережье Японии. Эпицентр землетрясения определен в Тихом океане на расстоянии около 70 км от ближайшей точки побережья Японии в 130 км к востоку от г. Сендай. Само землетрясение не имело чрезвычайных последствий, однако цунами произвело массовые разрушения на северных островах японского архипелага, причем волнам потребовалось всего около 10 мин, чтобы достичь первых пострадавших областей Японии, а через 69 мин цунами затопило аэропорт г. Сендай. Слишком близко у берегов Японии произошло землетрясение и, несмотря на переданное предупреждение о цунами, времени для организации эвакуации людей и подготовки к удару цунами оказалось недостаточно [2]. По состоянию на 21 апреля 2011 г. число погибших в результате землетрясения и цунами в 12 префектурах Японии составило 14 133 человека, 13 346 человек числились пропавшими без вести, 5304 человека ранены. По данным японского агентства Kyodo News со ссылкой на подсчеты местного правительства ущерб от землетрясения и цунами оценивается в 16–25 триллионов иен (198–309 миллиардов долларов) [3].

Институт земной коры
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск

Научно-исследовательский институт биологии
Иркутского государственного университета

Таким образом, цунами формируется в больших водоемах над очаговыми зонами сильных землетрясений. Следовательно, волны цунами являются атрибутом сейсмоопасных областей с большими водоемами и представляют чрезвычайную угрозу для населения и инфраструктуры береговых зон. Одной из таких сейсмоопасных областей на территории России является Байкальский рифт, сформировавший глубоководный бассейн оз. Байкал. В работе рассматриваются предпосылки и возможности явления цунами на оз. Байкал, а в качестве примера приводится катастрофическое Цаганское землетрясение, произошедшее у восточного побережья оз. Байкал 12 января 1862 г. (31 декабря 1861 г. по старому стилю; $M = 7.5 \pm 0.4$, $\varphi = 52.3^\circ$ с.ш., $\lambda = 106.7^\circ$ в.д.) и вызвавшее цунами.

Озеро Байкал расположено в Центральной Азии и имеет координаты по широте и долготе в диапазоне $\varphi \approx 51.5^\circ - 55.8^\circ$ с.ш. и $\lambda \approx 103.6^\circ - 109.9^\circ$ в.д. Длина озера около 636 км, ширина от 25 до 80 км при средней ширине 48 км. Глубина озера достигает в южной впадине 1423 м, в центральной — 1637 м и в северной впадине — 890 м при средней глубине около 730 м [4]. Байкал — это уникальное явление на планете Земля, самое глубокое озеро мира, площадь водной глади 31.5 тыс. км², объем водной массы 23000 км³ при водосборном бассейне около 557 тыс. км². В Байкале сосредоточено почти 1/5 мировых запасов поверхностной пресной воды и более 90% пресной воды России. Богат и разнообразен растительный и животный мир Байкала, сформированный за десятки миллионов лет эволюции озера. Его водную толщу от поверхности до максимальных глубин населяют около 600 видов растений и свыше 1200 видов животных, из которых 3/4 эндемичны.

Как следует из приведенного описания цунами, эти волны формируются там, где выполнены следующие основные условия:

имеется водный бассейн достаточно больших размеров и глубины;

в литосфере под этим бассейном происходят землетрясения достаточно большой магнитуды, при которых протяженные участки дна водоема и прибрежной зоны смещаются вверх или вниз.

Характеристики оз. Байкал (длина, ширина, глубина) свидетельствуют о его огромных пространственных размерах и очевидном выполнении первого условия. Дополнительные факторы, такие как прибрежный и береговой рельеф, могут обеспечить особенности формирования волн цунами — их скорость, высоту и проникающую способность. В отличие от крутого западного берега, восточный берег озера достаточно пологий, и эта особенность может способствовать проявлению волн цунами на восточном берегу Байкала. Кроме того, на восточном берегу чаще встречаются не-

благоприятные по рельефу участки — клинообразные бухты, долины рек и т.д.

На рис. 1 представлена карта эпицентров коровых землетрясений с магнитудой $M \geq 5$, произошедших под озером и вокруг него за инструментально-исторический период (1724–2011 гг.) по данным “Каталога землетрясений Прибайкалья”. Выбор такого диапазона магнитуд обусловлен тем, что минимальная магнитуда землетрясения, при которой возникает поверхностное разломообразование, происходит быстрое перемещение поверхности блока литосферы и формирование возмущения на поверхности водоема, равна $M_L \approx 5$ [5]. Амплитуда смещений блока при землетрясениях такой магнитуды составляет около 0.04 м [6], и в силу малой сжимаемости воды примерно такой же будет амплитуда возмущения на поверхности водоема. Эта величина близка к нижнему пределу диапазона высоты волн в области возникновения цунами (0.01–5 м). Таким образом, сформировать волну цунами на озере Байкал могут землетрясения начиная с магнитуды $M \approx 5$.

Вертикальные перемещения блоков литосферы происходят при землетрясениях-сбросах (блок опускается вниз) и землетрясениях-взбросах (блок поднимается вверх). Обычно среди землетрясений Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) преобладают сбросы — землетрясения, при которых подвижка в очаге приводит к вертикальному опусканию блока литосферы. Совместный анализ фокальных механизмов и сейсмических моментов сильных землетрясений БРЗ показал, что частота реализации сильных землетрясений-сбросов высока в Байкальской впадине [7]. Вместе с тем при перестройках напряженного состояния в литосфере БРЗ резко возрастает частота реализации сильных толчков-взбросов. Таким образом, под Байкальской впадиной происходят сильные землетрясения как с поднятием, так и опусканием блоков литосферы, т.е. толчки, в результате которых происходит смещение вверх или вниз протяженных участков дна водоема и прибрежной зоны. Следовательно, второе условие, необходимое для формирования цунами на Байкале, также выполняется.

Параметры и эффекты проявления цунами зависят от величины землетрясения и типа подвижки в очаге. Размеры и амплитуда перемещения блока литосферы увеличиваются с ростом магнитуды землетрясения [6]: так, если при толчке с магнитудой $M = 5$ длина и ширина очага корового землетрясения равны соответственно $L \approx 8.3$ км и $W \approx 3.6$ км при смещении по разрыву $D \approx 0.04$ м, то при магнитуде $M = 7$ — $L \approx 62$ км, $W \approx 24$ км и $D \approx 1.2$ м (табл. 1). В табл. 1 представлены параметры очагов коровых землетрясений с магнитудой $M \geq 5$, полученные по мировым данным. Можно полагать, что с учетом отмеченных выше особенностей фокальных параметров землетря-

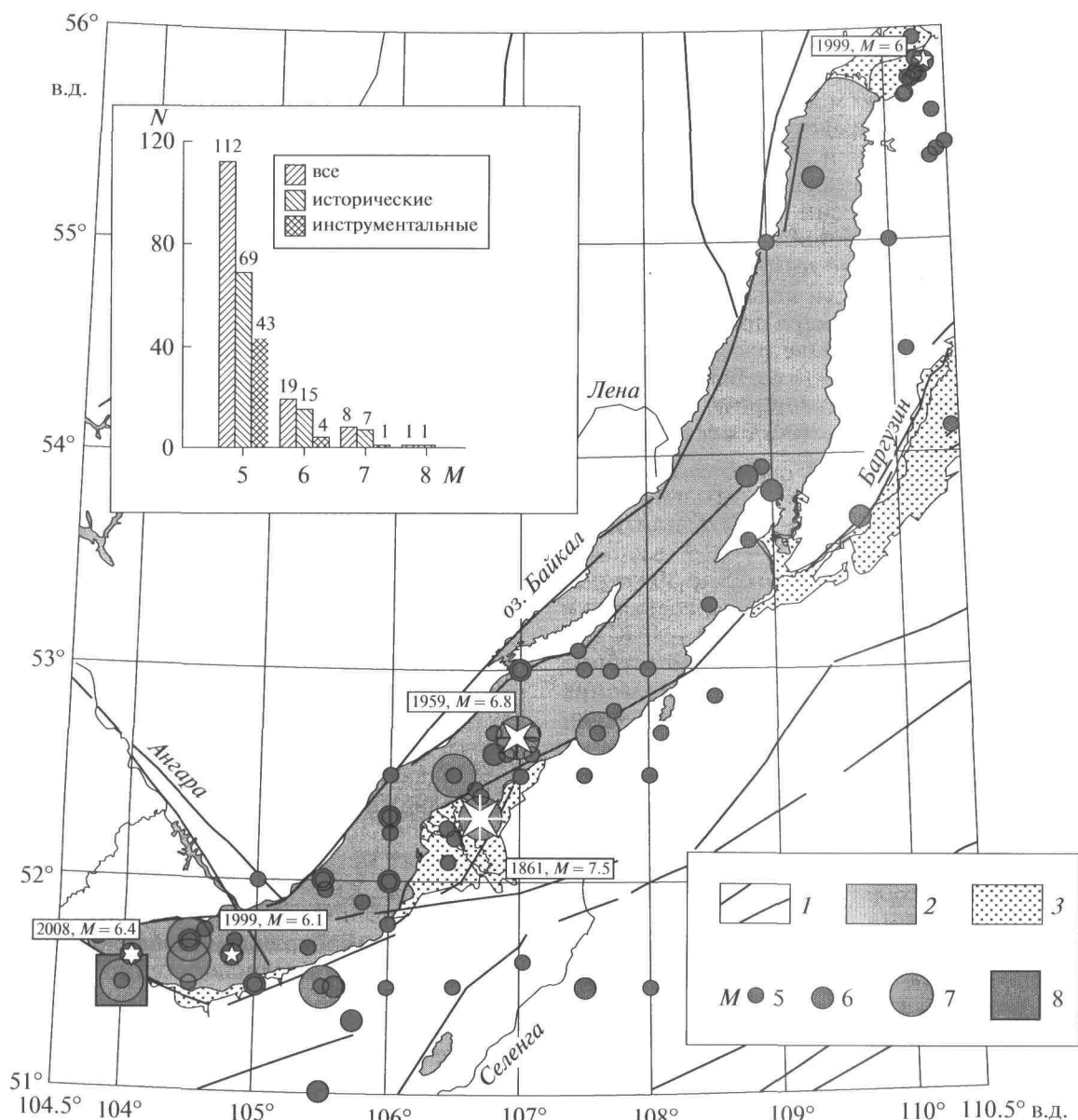


Рис. 1. Карта эпицентров байкальских землетрясений с магнитудой $M \geq 5$ за инструментально-исторический период (1724–2011 гг.). 1 – основные разломы, 2 – озеро Байкал, 3 – впадины. Эпицентр и магнитуда землетрясения соответствуют кружку и цифре в легенде. Эпицентр Большого Южно-Байкальского землетрясения 1742 г. ($M = 7.7$) выделен квадратом. Эпицентр Цаганского землетрясения отмечен кружком со звездочкой и подписью 1861, $M = 7.5$. Эпицентры землетрясений инструментального периода с $M \geq 6$ выделены кружками со звездочками и подписями: Средне-Байкальское – 1959, $M = 6.8$, Южно-Байкальское – 1999, $M = 6.1$, Кичерское – 1999, $M = 6$, Култукское – 2008, $M = 6.4$. На врезке приведены гистограммы распределения по магнитуде байкальских землетрясений с $M \geq 5$ за инструментально-исторический (1724–2011 гг.), исторический (1724–1949 гг.) и инструментальный (1950–2011 гг.) периоды.

сений Байкальской впадины длина и ширина очага землетрясения будут примерно соответствовать длине волн цунами, а смещение по разрыву – амплитуде возмущения в эпицентральной зоне.

Данные табл. 1 указывают, что выходящая за пределы 1 м амплитуда волн цунами может наблюдаться только при сильных землетрясениях с

магнитудой с $M > 7$. Менее высокие волны, в том числе и волны цунами, при отсутствии специальных наблюдений и без пространственно-временной корреляции с землетрясениями всегда будут интерпретироваться как обычные ветровые волны на Байкале. Ситуация примерно такая же, как при отсутствии сейсмических станций в сейсмоопасной зоне, – проявляются только сильные

землетрясения, ощущаемые человеком и вызвавшие некоторые нарушения, а все многочисленные менее сильные толчки не фиксируются. Поэтому для обнаружения и идентификации волн цунами на Байкале необходимо создать соответствующую систему мареографических наблюдений и осуществить мониторинг цунами. Наблюдения за цунами следует вести в ждущем режиме, переключаемом на режим регистрации при реализации под Байкальской впадиной сильных землетрясений с $M \geq 5$ по результатам сейсмического мониторинга. Последующая корреляция с гипоцентрией и параметрами очагов землетрясений позволит установить основные статистические закономерности и связи очаг землетрясения—цунами и выявить пространственно-временные особенности формирования и распространения волн цунами на берегах Байкала.

На врезке и рис. 1 приведены гистограммы распределения чисел землетрясений Байкальской впадины по магнитудам по всем имеющимся материалам (1724–2011 гг.) за инструментальный период наблюдений (1950–2011 гг.) и по историческим (1740–1949 гг.) данным. Вид гистограмм указывает на существенный дефицит сильных толчков (с $M \geq 7$) в инструментальный период наблюдений и слабых толчков (с $M \leq 6$) в исторический период. Это обусловлено малой продолжительностью инструментального периода наблюдений и пропуском большей части землетрясений с $M \leq 6$ в историческое время. В целом можно утверждать, что под Байкальской впадиной происходят землетрясения с магнитудой до $M \approx 8$ (Большое Южно-Байкальское, $M = 7.7 \pm 0.4$, $\varphi = 51.5^\circ$ с.ш., $\lambda = 104.0^\circ$ в.д.), а при одном из наиболее сильных (Цаганское, 1861, $M = 7.5$) документально зафиксировано цунами. Этот факт подтверждает вывод о том, что при отсутствии специальных наблюдений цунами на Байкале будут замечены и классифицированы как последствия цунами только при сильнейших землетрясениях. Квалифицированное описание Цаганского землетрясения и его последствий сделал горный инженер Н. Лопатин, побывавший в эпицентральной области в январе 1862 г. и опубликовавший в начале февраля 1862 г. собранные сведения в иркутской газете “Амур” [8]. Совместно с данными других наблюдателей [9] они позволяют подробно представить проявления этого землетрясения и цунами, обобщенные С.И. Голенецким [10].

При Цаганском землетрясении в очаговой области произошло сбросовое смещение и ускоренное, но не мгновенное опускание земной поверхности, в результате которого в районе дельты р. Селенги был сформирован обширный залив Провал площадью свыше 200 км^2 . Землетрясение сопровождалось серией сильных форшоков и многочисленных афтершоков [9, 11], а интенсивность сотрясений в г. Иркутске достигала 7–8 баллов

Таблица 1. Параметры очагов коровых землетрясений

M	M_0 , дн · см	L , км	W , км	D , м
5	$0.25 \cdot 10^{24}$	8.3	3.6	0.04
6	$0.10 \cdot 10^{26}$	23	9.2	0.2
7	$0.40 \cdot 10^{27}$	62	24	1.2
8	$0.16 \cdot 10^{29}$	170	60	6.6
9	$0.63 \cdot 10^{30}$	470	150	38

Примечание. M и M_0 – магнитуда и сейсмический момент землетрясения, L и W – длина и ширина очага землетрясения, D – смещение по разрыву [6].

[10]. Возможно, что постепенное опускание земной поверхности было вызвано длительным афтершоковым процессом. Отсутствие сильных разрушений и небольшое число жертв (3 человека и несколько тысяч скота) при Цаганском землетрясении и цунами связано со слабой заселенностью местности в это время. Вполне вероятно, что если землетрясение подобной магнитуды произойдет сейчас по аналогичному сценарию, например, в районе г. Байкальска (или другого крупного населенного пункта на берегу озера), то погружение под воду огромной территории приведет к многочисленным человеческим жертвам, разрушению социальной инфраструктуры, жилой недвижимости, зданий и очистных сооружений Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, и тогда будет уничтожена уникальная экосистема оз. Байкал. Поскольку под Байкальской впадиной частота реализации сильных землетрясений-сбросов высока [7], то погружение береговой части суши под воду возможно на всем побережье озера, однако подобный сценарий развития сейсмической катастрофы не учтен в документах ОСР-97 [12] и не рассматривается службами спасения МЧС. Можно полагать, что вероятность проявления катастрофических последствий цунами более высока в районе дельты р. Селенги, поскольку там имеется залив Посольский сор, имеющий сходную с заливом Провал природу формирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (09–05–00014_a) и НОЦ “Байкал”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большая Советская Энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. 3-е изд. М.: Сов. энциклопедия, 1978. 616 с.
2. Пинегина Т.Г. // Природа. 2011. № 5. С. 43–48.
3. <http://ru.wikipedia.org/wiki>
4. Атлас Байкала. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993. 160 с.
5. Bonilla M.G. // Bull. Assoc. Engen. Geol. 1988. V. 25. № 1. P. 17–29.
6. Ризниченко Ю.В. В кн.: Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.

7. *Ключевский А.В., Демьянович В.М.* // ДАН. 2007. Т. 417. № 2. С. 245–250.
8. *Лопатин Н.* О землетрясениях при устьях р. Селенги и около этой местности. “Амур”. № 11. 7 февраля 1862 г.
9. *Мушкетов И.В., Орлов А.П.* Каталог землетрясений Российской империи // Зап. Рус. географ. об-ва. По общей географии. Т. 26. СПб.: Типография Император. АН, 1893. 359 с.
10. *Голенецкий С.И.* Землетрясения в Иркутске. Иркутск: ИМЯ, 1997. 92 с.
11. *Голенецкий С.И., Пензина Т.Г.* В кн.: Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. В. 2/3. С. 308–314.
12. *Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 1:8000000. Объясн. зап. и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.