

Спектральные характеристики записей сильных движений на примере Култукского землетрясения

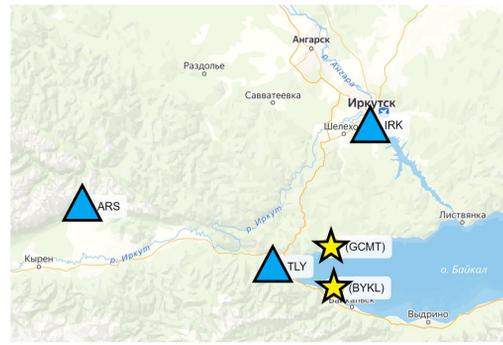
Скоркина А.А.

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

E-mail: anna@mitp.ru

В задачах оценки возможного сейсмического воздействия на определенной территории важнейшую роль играет накопленный материал **зарегистрированных сильнейших землетрясений рассматриваемого региона**. Так, для города Иркутска, важными являются записи акселерометров Култукского землетрясения $M_w=6.3$ (27 августа 2008 года), **полученные в ближней зоне**.

На рисунке звездами обозначены два варианта локации эпицентра главного землетрясения, а также три ближайшие станции, оснащенные акселерометрами, а именно, «Талая» или TLY, «Иркутск» или IRK, «Аршан» или ARS.



Традиционный подход к учету сейсмических воздействий заключается в применении **региональных эмпирических зависимостей**, например, максимальной амплитуды ускорений или других параметров от расстояния и магнитуды ([Аптикаев, 2012] и др.). При этом, большинство таких эмпирических зависимостей получены по набору информации о землетрясениях умеренных магнитуд с ограниченного диапазона расстояний (связанных с апертурой сейсмических сетей), а далее, такие зависимости экстраполируются на большие магнитуды, с допущениями.

Другой проблемой, с которой столкнулся традиционный подход эмпирического учета сейсмических воздействий, - это **сложность очагового процесса** (что приводит к увеличению количества параметров очага землетрясения, необходимых для корректного учета наблюдаемых сейсмических воздействий).

В настоящее время признано, что описание очага сильного землетрясения функцией точечного источника позволяет получить только «кажущиеся» характеристики очага, так как сам очаг имеет сложную структуру, и соответственно, характеризуется сложной функцией источника (например, функцией производной сейсмического момента по времени, seismic moment rate), что, в первую очередь, проявляется на близких расстояниях и **должно быть учтено при получении оценок сейсмической опасности**.

Именно по этой причине, каждое сильное землетрясение, инструментально зарегистрированное на близких гипоцентральных расстояниях, должно изучаться детально, в широком диапазоне частот, и далее спектральные характеристики необходимо учитывать **при оценке возможного сейсмического воздействия** на территории (особенно, когда речь идет в терминах пиковых ускорений).

Сейсмическая станция	Широта	Долгота	Грунтовые условия	Принятая k_0
TLY	51.681	103.644	Глибы, щебень, дресва до 5 м, мраморы, сланцы	0.012
IRK	52.243	104.271	Суглинки микропористые до 13 м	0.02
ARS	51.920	102.421	Глибы, дресва, щебень, с заполнением суселью (до 5 м)	0.012

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД

Для расчета акселерограмм использовали известный метод [Вооге, 2003].

Анализируя наблюдаемые очаговые спектры для Байкальского региона (например, [Добрынина, 2009]), было отмечено, что высокочастотная часть таких спектров не всегда оптимально описывается с помощью известной модели «омега-квадрат» [Brune, 1970].

В выполненном исследовании мы использовали модель источника Аки-Бруна-Гусева [Скоркина, Гусев, 2017], которая позволяет моделировать меньшие амплитуды смещений в высокочастотной части спектра. Опишем более детально такой подход. Мы подразумеваем, что функция очагового спектра $m(f) = \dot{M}_0(f)/M_0$ имеет форму

$$m(f) = K_1(f) \cdot K_2(f),$$

где каждый множитель $K_k(f)$, $k = 1, 2$, описывает вклад каждой характерной частоты очагового спектра f_{ck} . Функция $K_k(f)$ имеет форму

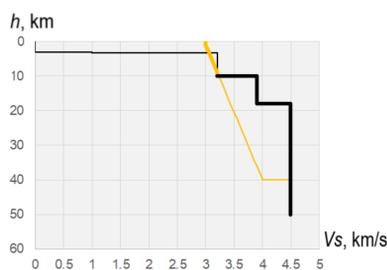
$$K_k(f) = \left(1 + \left(\frac{f}{f_{ck}} \right)^{2\delta_k/\beta} \right)^{-\beta\phi_k/2}$$

Чтобы получить спектр в соответствии с моделью Бруна [Brune, 1970], в модификации Боутрайта [Boatwright, 1978], модельные параметры должны соответствовать:

$$K_3(f) = 1; f_{c1} = f_{c2}; \beta = 0.5; \delta_1 = 1; \phi_1 = 1. \text{ В наших вычислениях мы подразумевали, что: } \beta = 0.5; \delta_k = \{1.25, 0.75\}; \phi_k = \{1.0, 1.0\}.$$

Для описания эффектов распространения сейсмических волн необходимо учесть эффекты скоростной модели среды, затухания сейсмических волн и грунтовые условия.

Используемая скоростная модель представлена на рисунке. Единственная частотно-зависимая модель затухания, полученная для наиболее близкого к рассматриваемому региону описана в [Павленко, Тубанов, 2017]. К сожалению, в рассматриваемом регионе отсутствует совсем подробная информация о скоростной структуре верхней части разреза, что, конечно, значительно снижает ценность полученных акселерограмм. Тем не менее, данные сильных движений, записанные акселерометрами, могут быть интерпретированы в первом приближении, если для коррекции значений полученных спектральных амплитуд мы воспользуемся известным параметром «каппа» (k_0), значения которого подберем, основываясь на зарубежной практике в согласии с имеющимся качественным описанием грунтовых условий вблизи мест установки приборов (Таблица).



Используемая скоростная модель ak135 [Kennett et al., 1995] с модификацией, доступной для Байкальского региона [Zorin et al., 2002].
Черная линия соответствует модели ak135
Оранжевая линия – согласно [Zorin et al., 2002].
Жирная линия (оранжевая от 0 до 10 км и черная от 10 до 50 км) соответствует используемой скоростной модели

РЕЗУЛЬТАТЫ

Синтетические акселерограммы Култукского землетрясения представлены

в Таблице, где они сопоставлены с записями сильных движений, полученными в рамках сейсмического мониторинга, выполняемого ФИЦ ЕГС РАН.

В колонке “intensity” представлены два значения интенсивности, где “observed” – макросейсмические данные [Мельникова и др., 2014], и “modelled” вычислены, используя пиковые ускорения модельных акселерограмм согласно [Wald et al., 1999]:

$$I = 3.66 \lg(\text{PGA, cm/s}^2) - 1.66, \quad 5 \leq I \leq 9.$$

Полученные волновые формы неплохо соответствуют наблюдаемым. Например,

для станции TLY, наблюдается два независимых пика.

Однако более очевидно соответствие модели Аки-Бруна-Гусева

при рассмотрении очаговых спектров, которые представлены на рисунке.

Так как станция TLY расположена в ближней зоне (29 км от очага $M_w 6.3$),

мы можем интерпретировать только высокие частоты очагового спектра,

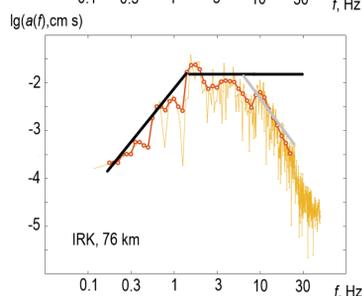
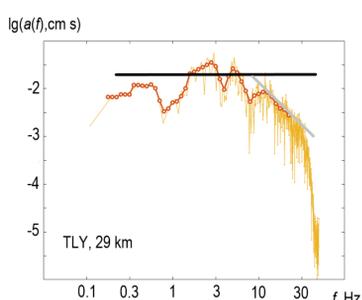
где высокочастотный спад (f_{\max}) соответствует модели Аки-Бруна-Гусева. В классической модели Бруна (более распространенной

в настоящее время) плато должно продолжаться во всем диапазоне высоких частот (в соответствии с черной линией на рисунке).

Для станции IRK (на 76 км), спектр возможно проанализировать в более широком частотном диапазоне, и даже выделить первую

характерную частоту. В этом случае, до 3 Гц модель соответствует классической модели Бруна, однако, далее

мы снова наблюдаем высокочастотный спад.



Очаговые спектры ускорений (оригинальный и сглаженный) для станций TLY и IRK. Черной линией обозначена модель Бруна, и серой линией – высокочастотный спад в соответствии с моделью Аки-Бруна-Гусева

Station	Observation	Modeling	Intensity
TLY ($\Delta=28.8$ km)			$I = 7.0$ (observed) $I = 6.9$ (modelled)
IRK ($\Delta=76.2$ km)			$I = 6.0$ (observed) $I = 5.8$ (modelled)
ARS ($\Delta=116.9$ km)			$I = 5.0$ (observed) $I = 5.2$ (modelled)

Важно, что такой высокочастотный спад располагается в интервале 7–10 Гц, что может описываться как эффект, «контролируемый очагом», а вот резкость этого спада описывается разницей грунтовых условий, описываемых через широко распространенный параметр k_0 .

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда No 20-17-00180п «Развитие сценарного подхода в задачах оценки сейсмической опасности и риска».