

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55310

РАСЧЕТ СТАЦИОННЫХ ПОПРАВОК (САЙТ-ЭФФЕКТ) НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА

© 2015 Г.Д. Етирмишли, д.г.-м.н., С.Э. Казымова, к.г.-м.н., И.Э. Казымов

Национальная Академия Наук Азербайджана Республиканский Центр Сейсмологической Службы, Az 1001 Баку, ул. Нигяр Рафибейли, 25

Работа посвящена изучению влияния среды сайт-эффект станции («усиление») на пути сейсмического луча при распространении поперечных волн от сильных землетрясений. Был произведен расчет стационарных поправок для землетрясений с магнитудой выше 5 произошедшие в 2012–2015 гг. с применением метода Накамуры. На основе полученных осредненных данных для каждой станции была построена пространственная карта распределения фактора усиления для территории Азербайджана. Общее значение фактора меняется в пределах 1,5–3,6. Максимум наблюдается в зоне Куринской впадины и Закаतालском районе, что свидетельствует о слое земной коры под станциями этих регионов усиливающих воздействие поперечной волны на протяжении источник-приемник.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмический шум, метод Накамуры, сайт-эффект станции, фактор усиления поперечных волн.

Введение

Азербайджан располагается на территории Кавказского региона, характеризующийся высоким уровнем сейсмической активности. Сведения о сейсмичности территории Азербайджана, где неоднократно происходили сильные катастрофические землетрясения, до начала XX века носили описательный характер. Летопись ведется с 427 г. когда произошло катастрофическое 9-тибальное Гянджинское землетрясение. Началом инструментального периода сейсмических наблюдений в Азербайджане считается 1902 г., когда после катастрофического Шамахинского землетрясения была основана первая сейсмическая станция «Шамахи».

Многие районы Азербайджана отличаются повышенной сейсмичностью, особенно южный склон Большого Кавказа в районе Шеки – Шемахи и южная часть Малого Кавказа, прилегающая к Араксу. В последние годы значительно возросла сейсмичность Закаतालского, Габалинского районов а так же зона Центрального и Северного Каспия.

Определений динамических и кинематических параметров очагов землетрясений, таких как сейсмический момент, размер очага, сброшенное напряжение и амплитуда подвижки, скорость и направление распространения разрыва в очаге здесь практически не проводилось из-за отсутствия необходимой для анализа цифровой аппаратуры.

На современном этапе (начиная с 2003 г.) плотная сеть высокочувствительных цифровых сейсмических станций в количестве 35-ти, позволяющая регистрировать все сейсмические события с магнитудой $M > 0,1$ в пределах Азербайджана, позволили получить новые данные по механизму очагов землетрясений, что позволило более детально изучить закономерности современного деформационного процесса в литосфере Азербайджана.

Целью данных исследований являлось выявление закономерностей затухания сейсмических волн для литосферы Азербайджанской части Большого Кавказа, а также изучение кинематических и динамических параметров землетрясений региона.

Сейсмичность

За период 2003–2015 гг. сейсмичность была неравномерной как по величине выделенной сейсмической энергии, так и по количеству произошедших землетрясений. Наиболее интересными по величине выделенной сейсмической энергии были 2007 г., 2012-2013 гг. и 2014 г (рис. 1). В 2007 г. величина суммарной энергии достигла $E = 73,9 \cdot 10^{11}$ Джоулей. Это связано с тем, что на изучаемой территории произошло несколько землетрясений с $m_l \geq 4,2$: (11 января – в акватории северного Каспия с $m_l=4,9$; 11 июля – в Тальшской горной системе с $m_l = 4,9$, $J_0 = 6б.$; 23 августа в Шамахи-Исмаиллинском районе с $m_l=4,3$ и 19 сентября на территории Малого Кавказа с $m_l = 4,2$, $J_0 = 5б.$).

Однако интерес представляют события произошедшие в последующие годы, начиная с 2012 г., когда резко обострилась сейсмическая обстановка – на территории республики. Происходит ряд землетрясений с интенсивностью 5–7 баллов и $m_l \geq 5$.

В 2012 г. активизация началась 7 мая в 04^h40^m и в 14^h15^m, когда на северо-западе республики в районе Загаталы произошли два сильных землетрясения с $m_l = 5,6$ и 5,7, которые ощущались в эпицентре с $J_0=7б$. Они имели большую афтершоковую активность: в I сутки произошло 170 афтершоков, а до конца мая – более 500.

После Загатальских землетрясений 7 мая произошла активизация вдоль всей шовной зоны этих структур, а именно: 14 мая и 25 июня происходят землетрясения в районе Шеки с $m_l = 4,1$, $J_0 = 5б.$; 18 мая – афтершок Загатальских землетрясений с $m_l = 5$, $J_0 = 6б.$; 7 октября – в Исмаиллинской зоне с $m_l=5,3$ (глубина 41 км), $J_0 = 4-5б.$; 14 октября – в Балакене с магнитудой $m_l = 5,6$, $J_0 = 6б$.

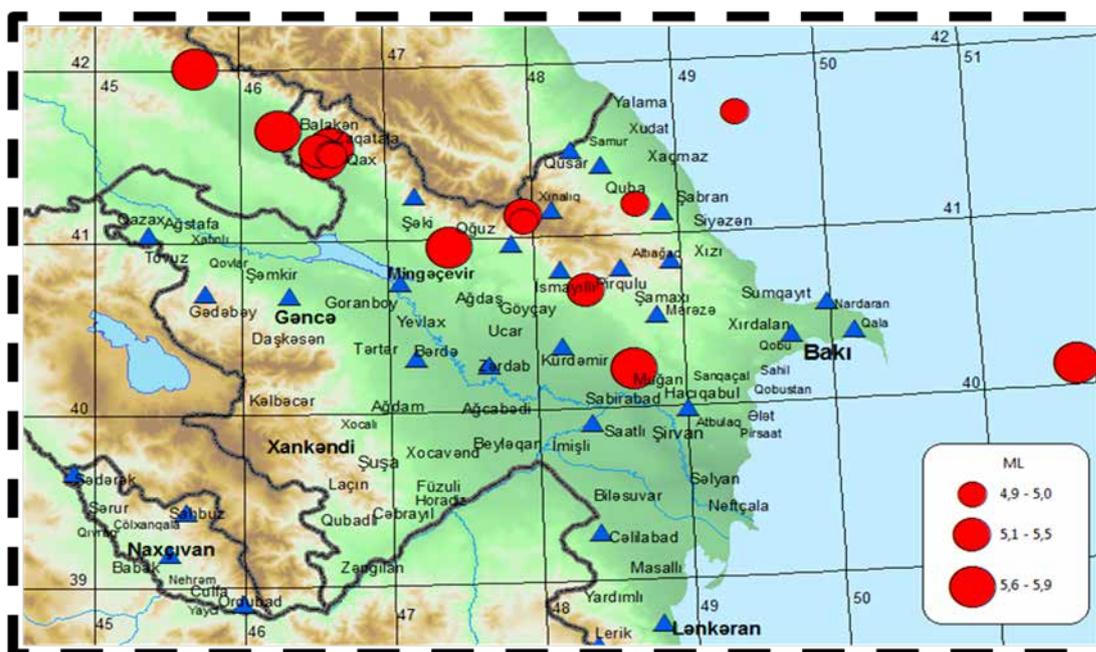


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений за период 2012–2015 гг. с $m_l > 5,0$

В 2013 г., несмотря на то, что число землетрясений увеличилось на порядок, количество выделенной сейсмической энергии ($E = 122 \cdot 10^{11}$ Дж) уменьшилось более, чем в 10 раз. В 2013 г. в ряде районов происходят землетрясения с $m_l \geq 4$: в Самухском районе, а также в районах Шеки, Губы, Габалы. В 2013 году было зафиксировано 24 ощутимых землетрясения.

Величина выделенной сейсмической энергии в 2012 г. достигла $E = 1670 \cdot 10^{11}$ Дж, в 2013 г. это величина уменьшилась до $E = 122 \cdot 10^{11}$ Дж.

В 2014 г. число землетрясений и количество выделенной сейсмической энергии увеличилось. Было зафиксировано 25 ощутимых событий из которых 6 землетрясений с магнитудой с $m_l \geq 5$. Из них наиболее сильными можно отметить землетрясение произошедшее в Гаджигабуле 10.02.2014 по местному времени 16:06 ^h40^m с магнитудой 5,8 ($h = 56$ км), ощущалось до 5–3 баллов а также землетрясение произошедшее в Каспийском море 07.06.2014 по местному времени 11:05 с магнитудой 5,6 ($h = 61$ км), ощущалось до 3 баллов.

В 2015 г. наиболее значительным событием явилось землетрясение 4 сентября произошедшие в Огузском районе с $m_l = 5,9$.

Динамические параметры

Решение многих сейсмологических задач, основанных на использовании данных землетрясений тесно связано с определением кинематических и динамических параметров очагов землетрясений. Под кинематическими параметрами мы понимаем параметры гипоцентра – время в очаге, координаты эпицентра, глубина очага. В качестве динамического параметра мы понимаем спектральную плотность Ω_0 , угловую частоту f_0 , сейсмический момент M_0 , радиус круговой дислокации R , сброшенное напряжение D_s , среднюю подвижку по разрыву D [Лемзиков В., Лемзиков М., 2010]. Исследование динамических параметров очагов землетрясений необходимо для решения многих задач фундаментальной и прикладной сейсмологии [Макагон, Сычева, 2013].

Известно, что характер движений, записываемых на сейсмограмме, определяется как средой на пути распространения сейсмических волн, так и источником, необходим комплексный анализ записи, который позволил бы получить дополнительную информацию об очаге землетрясения, лучше понять механизм источника [Bindi et al., 2000; Parolai et al., 2004; Picozzi et al., 2008].

Важным моментом при расчете динамических параметров является переход от стационарного спектра к очаговому. Для такого перехода требуется учесть влияние среды («ослабление») и сайт-эффект станции («усиление») на пути сейсмического луча [Лемзиков В., Лемзиков М., 2010; Макагон, Сычева, 2013; Пантелеева, 1994]. Существуют различные методы определения стационарных поправок, которые описаны в работах [Bindi et al., 2000; Parolai et al., 2004; Picozzi et al., 2008]. Цель исследований расчет стационарных поправок (определение сайт-эффекта станции) на основе анализа сейсмического сигнала с применением метода Накамуры [Nakamura, 1989].

В основу данного метода положены представления о том, что влияние тонкого слоя (небольшой слой земной коры непосредственно под сейсмической станцией) изучаемого объекта в большей части относится к поперечным волнам (S -волна), которые усиливаются этой структурой и практически не изменяют продольные волны (P -волна). Тогда отношение спектральных характеристик двух горизонтальных компонент к спектру вертикальной компоненты будет характеризовать так называемую передаточную функцию, которая строго зависит от тонкого слоя под рассматриваемым объектом [Макагон, Сычева, 2013].

Методика вычислений

Как известно, смещения земной коры измеряются в трех направлениях: север-юг (NS), восток-запад (EW) и вертикальное (Z). Метод Накамуры заключается в нахождении отношения спектра горизонтальной компоненты (H) к спектру вертикальной (V). Для этого необходимо использовать измерения 3-х составляющих сейсмограммы E, N, Z [Макагон, Сычева, 2013; Пантелеева, 1994] (рис. 2). Вычисление компоненты H происходит как среднее квадратичное спектров E и N компонент, вертикальной V соответствует спектр компоненты Z. Далее, вычисляется непосредственно отношение H/V:

$$H(f) = \frac{\sqrt{N^2(f) + E^2(f)}}{2} \quad (1)$$

$$H/V(f) = \frac{H(f)}{V(f)} \quad (2)$$

Таким образом, анализировались данные цифровых записей поперечной волны по трем компонентам HGE, HGN, HGZ 17 землетрясений с магнитудой выше 5. произошедшие в 2012–2015 гг. При исследовании длительность временного окна записи составило 60 сек [Макагон, Сычева, 2013].

Из выбранного участка записи устраняется линейный тренд и для предотвращения утечки спектра сигнал сглаживается на концах с помощью 5% косинусоидального окна [Макагон, Сычева, 2013]. К полученному ряду применяются поправки на погрешность измерения прибора и рассчитывается спектр с помощью преобразования Фурье [Макагон, Сычева, 2013]. На рисунке 3 показан пример преобразования спектра Фурье землетрясения произошедшего 4 сентября 2015 г. в Огузском регионе с магнитудой 5,9 по двум станциям «QUB» и «QBL».

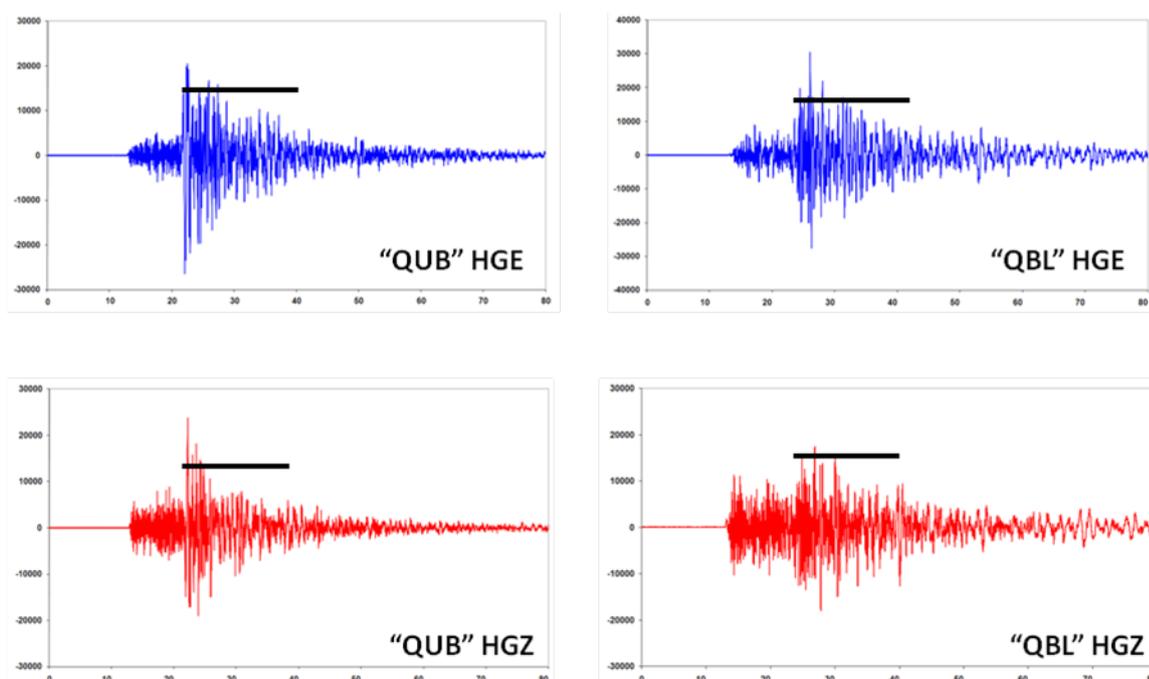


Рис. 2. Горизонтальная и вертикальная компоненты сейсмического сигнала на станциях «QUB» и «QBL»

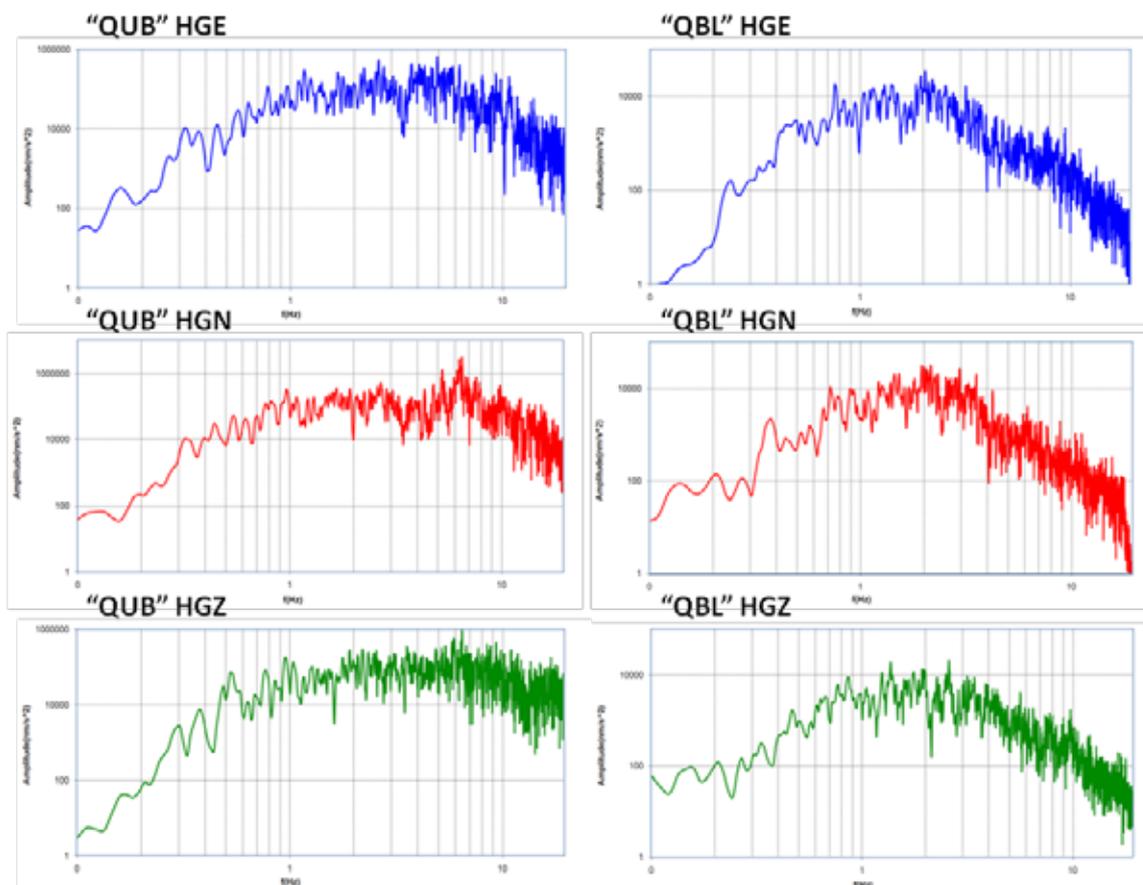


Рис. 3. Спектры горизонтальных (H) и вертикальной (V) компонент сейсмического сигнала на станциях «QUB» и «QBL»

На основе выше сказанного были вычислены спектральные отношения и найден сайт-эффект 20 широкополосных цифровых станций по 17 землетрясениям произошедшим в пределах Большого Кавказа. На нижнем графике представлен результат расчета H/V отношений для некоторых из них, представляющих наибольший интерес (рис. 4–9). В таблице 1 представлены осредненные значения станционных поправок, что является важным результатом, который можно использовать при переходе от станционного спектра к спектру очага землетрясения.

Далее учитывая все выше сказанное была построена карта распределения фактора усиления поперечной сейсмической волны на цифровых станциях по данным сильных землетрясений произошедших за 2012–2015 гг.

Результаты

Таким образом, был произведен расчет станционных поправок (определение фактора усиления) на основе анализа сейсмического сигнала землетрясений с магнитудой выше 5, произошедшие в 2012–2015 гг. с применением метода Накамуры.

Было установлено, что для станции ATG, NAX и GLB от землетрясений расположенных в ЮЮЗ направлении характерно усиление в 2,5–3,0 раза в интервале частот 4–10 Гц. Для станций ZKT, LKR, QSR, QZX ALI характерно усиление в 2,5–3,0 раза в интервале частот 0,3–1 Гц. Для станций IML и AST отклонений не наблюдается.

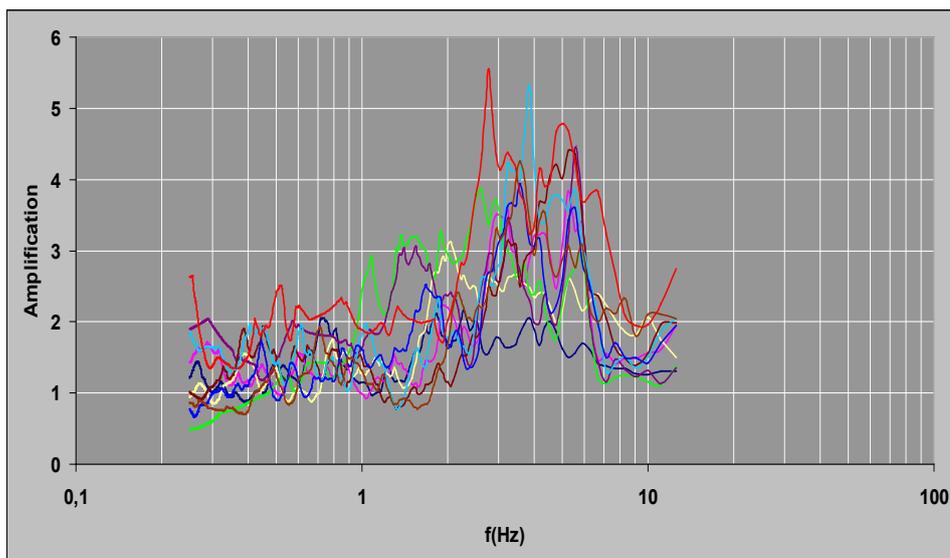


Рис. 4. Фактор усиления сейсмической волны на станции «AST»

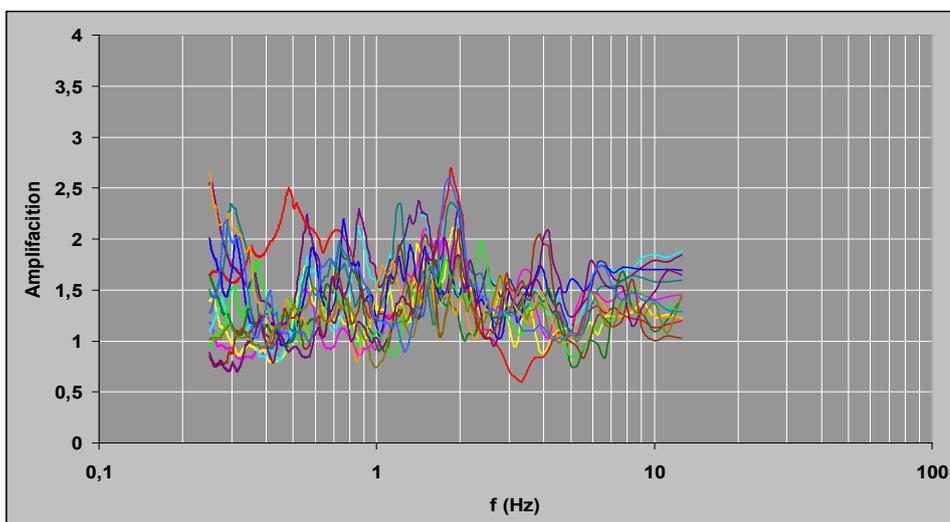


Рис. 5. Фактор усиления сейсмической волны на станции «SIZ»

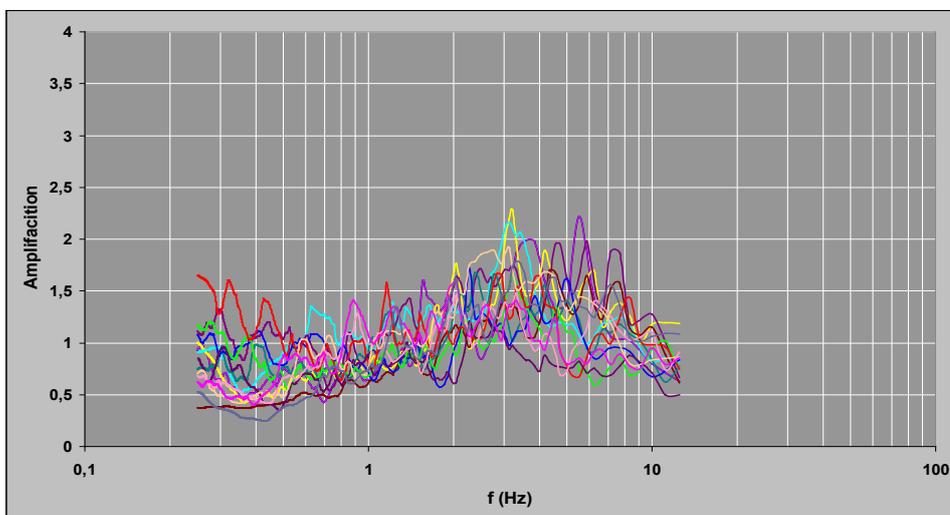


Рис. 6. Фактор усиления сейсмической волны на станции «QZX»

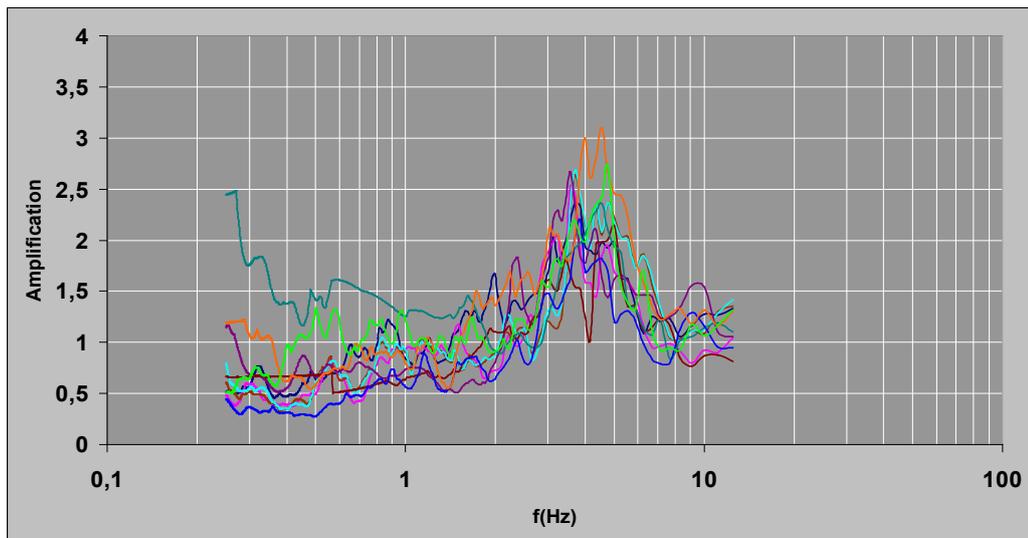


Рис. 7. Фактор усиления сейсмической волны на станции «LRK»

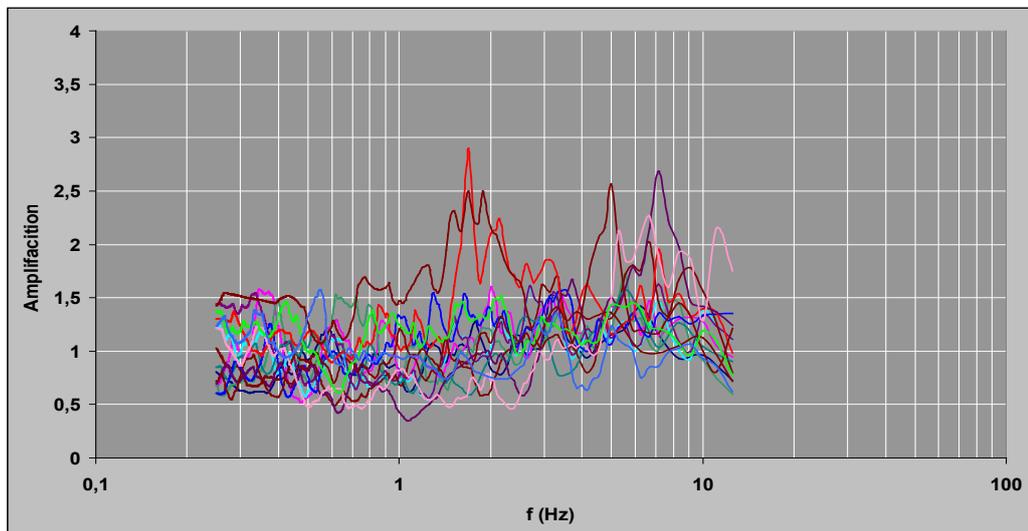


Рис. 8. Фактор усиления сейсмической волны на станции «XNQ»

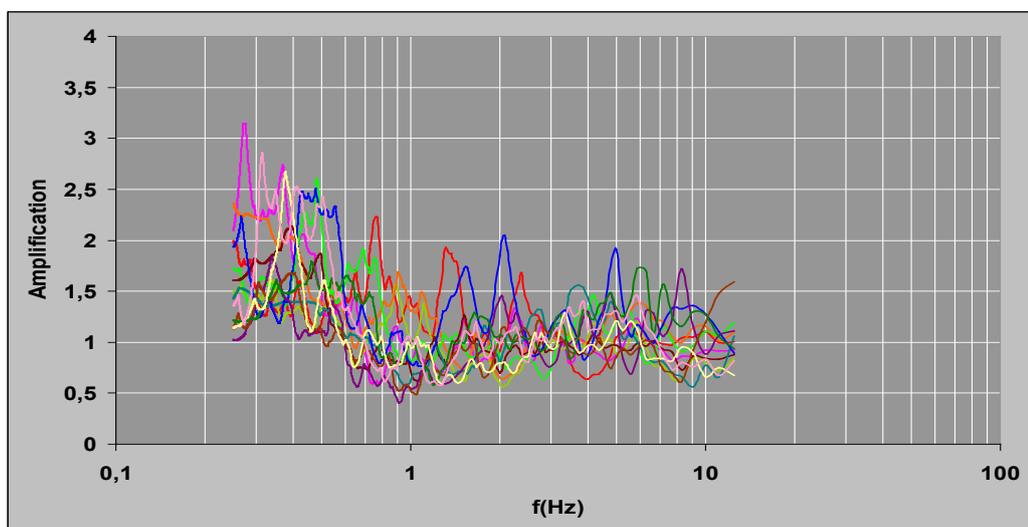


Рис. 9. Фактор усиления сейсмической волны на станции «GSR»

Таблица 1.

Средние значения фактора усиления на цифровых сейсмических станциях

Код сейсмических станций	Координаты сейсмических станций		Фактор усиления
	широта	долгота	
ALI	39.95	49.00	2.7
AST	38.56	48.79	3.5
GBS	40.53	48.94	1.8
GDB	40.72	45.75	1.6
GLB	39.24	48.39	2.8
IML	40.79	48.18	2.0
LKR	38.71	48.78	1.9
LRK	38.64	48.34	2.4
MNG	40.77	47.08	2.4
NAX	39.17	45.49	1.6
PQL	40.78	48.59	2.3
QBL	40.94	47.83	1.8
QSR	41.51	48.26	2.0
QUB	41.35	48.49	1.7
QZX	41.06	45.37	1.9
SEK	41.20	47.19	2.0
SIZ	41.07	48.89	2.4
XNQ	41.17	48.14	2.2
ZKT	41.63	46.62	2.7
ATG	40.86	48.93	1.5

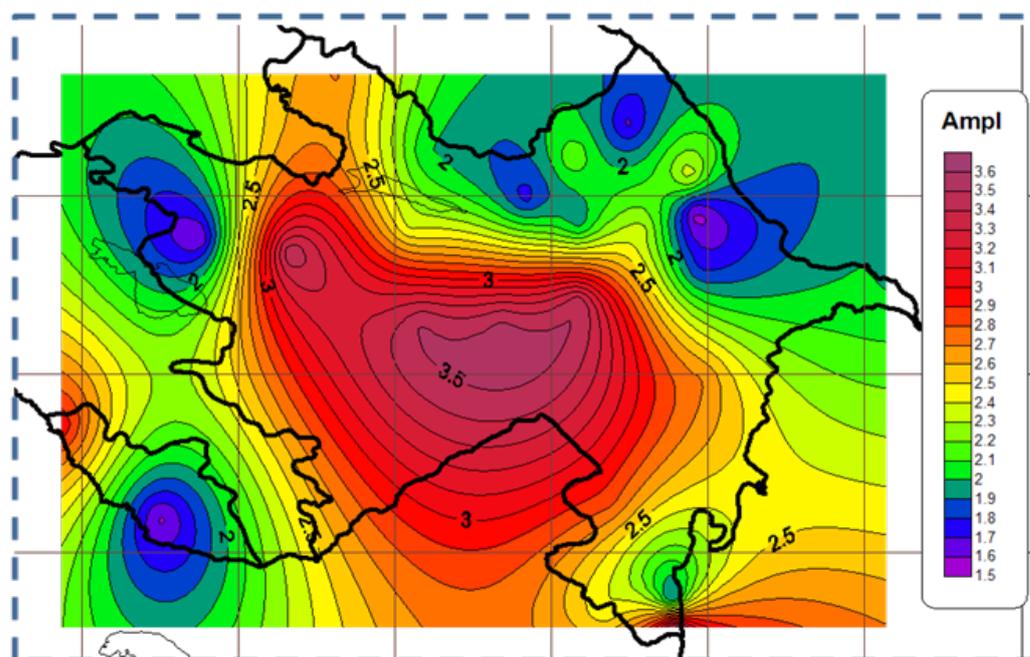


Рис. 10. Карта распределения фактора усиления поперечной сейсмической волны на цифровых станциях, по данным сильных землетрясений произошедших за 2012–2015 гг.

Однако для землетрясений находящихся в ССЗ направлении относительно станций, для станций AST LRK QZX XNQ характерно усиление в 2,5–3,0 раза в интервале частот 3–10 Гц.

На основе полученных осредненных данных для каждой станции была построена пространственная карта распределения фактора усиления для территории Азербайджана. Общее значение фактора меняется в пределах 1,5–3,6. Максимум наблюдается в зоне Куринской впадины и Закавказском районе, что свидетельствует о слое земной коры под станциями этих регионов усиливающих воздействие поперечной волны на протяжении источник-приемник.

Литература

1. Лемзиков В.К., Лемзиков М.В. Особенности затухания сейсмических волн в вулканических средах Камчатки, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский. 2010 176–185 с.
2. Макагон М.Ю., Сычева Н.А. Программный комплекс расчета станционных поправок (сайт-эффект) станций на основе сейсмического шума, Вестник КРСУ. 2013. Том 13. № 7, 90–96 с.
3. Пантелеева Т.А. Спектры и очаговые параметры землетрясений Крыма и их пространственно-временные особенности, Автореферат, Киев, 1994 г., 52 с.
4. Bindi D., Parolai S., Spallarossa D., Cattaneo M. Site effects by H/V ratio: Comparison of two different procedures / D. Bindi, S. Parolai, D. Spallarossa, M. Cattaneo // *Journ. of Earthquake Engin.* 2000. Vol. 4. № 1. P. 97–113. 3.
5. Parolai S., et al. Comparison of Different Site Response Estimation Techniques Using aftershocks of the 1999 Izmit Earthquake / S. Parolai, D. Bindi, M. Baumbach, H. Grosser, C. Milkereit, S. Karakisa, S. Zunbul // *Bulletin of the Seismological Society of Amer.* June, 2004. Vol. 94. № 3. P. 1096–1108. 2.
6. Picozzi M., et. al Site characterization by seismic noise in Istanbul, Turkey / M. Picozzi, A. Strollo, P. Parolai, E. Durukal, O. Ozel, S. Karabulut, J. Zschau, M. Erdik // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 2008. P. 2–6. 4.
7. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface / Y. Nakamura // *QR Railw. Tech. Res. Inst.* 30. 1989. P. 25–33.

DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55310

CALCULATION OF STATION AMENDMENTS (SITE EFFECT) BASED ON SEISMIC SIGNAL

**© 2015 G.J. Etirmishli, Sc. Doctor (Geol.-Min.), S.E. Kazymova, Sc. Candidate
(Geol.-Min.), I.E. Kazymova**

National Academy of Sciences of Azerbaijan Republican Seismic Survey Center,
Az 1001 Baku, str. Nigar Rafibeyli 25

The paper studies the influence of the environment (site effect Station) in the path of the ray during propagation of seismic shear-wave from strong earthquakes. It was calculated the station corrections for earthquakes with a magnitude above 5 occurred in 2012–2015 yy using the method of Nakamura. On the basis of the averaged data for each station was built dimensional distribution map of amplification factor for Azerbaijan. The total value of the factor varies within 1,5–3,6.

The maximum number observed in the zone of the Kura depression and Zakatala region, indicating that the layer of the earth's crust under the stations of the region to strengthen exposure the shear wave for source-receiver.

Key words: earthquake, seismic noise, the method of Nakamura, the site effect station amplification factor of transverse waves.