

550.34.01

Н. СИЛАЧЕВА¹, Д. БИНДИ², М. ПИЛЬЦ³, С. ПАРОЛАИ⁴

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В АЛМАТЫ ПО ИМЕЮЩИМСЯ ДАННЫМ МИКРОВИБРАЦИЙ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Алматы қаласының аумағындағы топырақтың сейсмикалық қайтару әсерінің бақыланған және үлгілік деректерін кешенді талдау жүзеге асырылды. Жүргізілген зерттеулер сейсмикалық қауіпті бағалауда және микроаудандауда аса маңызы бар алаптың жергілікті жағдайларының қосымша ерекшеліктері мен сипаттамаларын айқындады.

Выполнен комплексный анализ наблюдаемых и модельных данных сейсмической реакции грунта для территории г. Алматы. Проведенное исследование выявило дополнительные особенности и характеристики локальных условий бассейна, важные при оценке сейсмической опасности и микрозонировании.

The comprehensive analysis of the observed and model data of ground seismic response is carried out for the territory of Almaty city. The study revealed additional characteristics of the basin local conditions important for seismic hazard assessment and microzonation.

Для оценки вариаций параметров колебаний грунта на территории г. Алматы выполнены следующие исследования:

- С целью изучения возможности применения метода Накамуры для определения фундаментальной резонансной частоты на территории г. Алматы повторно проанализированы данные измерений сейсмического шума, проводившихся в 2000 г. [1]. На рис.1 показаны точки проведения измерений сейсмического шума и схема расположения пунктов сильных движений на фоне топографии [6] палеозойского (Pz) фундамента на территории города.

- На основе накопленных инженерно-геологических данных получены упрощенные характеристические одномерные модели для района города и рассчитаны соответствующие реакции грунта по методу Хаскела-Томпсона. Для каждой точки строилось три модели спектральных характеристик грунтов: 1) однослойная модель, учитывающая только границу четвертичных отложений (Q) и верхнего неогена (N₂), 2) двухслойная модель, включающая границу между верхним и нижним неогеном (N₂, N₁); 3) трехслойная

модель, учитывающая структуру до палеозойского фундамента. В модели с одним слоем над полупространством использовалась определенная геофизическими методами [6] скорость поперечных волн в четвертичном слое. Для двухслойной и трехслойной модели рассчитывались средневзвешенные скорости:

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}}$$

где h_i – мощность i -го слоя, v_i – скорость поперечных волн в i -м слое при $i=1, \dots, N$, где N – число рассматриваемых слоев.

- Выполнен анализ записей сильных движений методом спектральных отношений горизонтальных компонент к вертикальной (HV) и методом стандартных спектральных отношений (SSR).

1. Спектральное отношение горизонтальной компоненты к вертикальной для сейсмического шума (NHV). Наличие больших скачков акустической жесткости в осадочном

¹ Казахстан, 050060, г. Алматы, пр. Аль-Фараби 75а, Институт сейсмологии МОН РК, тел. 2694638

²⁻⁴ Германия, 14467, г.Потсдам, ул. Гельмгольца 7, Германский научно-исследовательский центр наук о Земле.

чехле и, особенно, на границе с палеозойским фундаментом должно выражаться в виде больших пиков в низкочастотном диапазоне функции спектрального отношения сейсмического шума NHV. Это подтверждается оценкой резонансной частоты в области низких частот, полученной с использованием одномерной теоретической модели в пунктах установки приборов сильных движений, и анализом эмпирических данных (землетрясений). Однако более глубокая переоценка имеющихся данных измерений микровибраций показала, что они не позволяют исследовать низкочастотный диапазон. Эти данные, полученные более 10 лет назад на системе Seismic Logger 3 с датчиком скоростного типа и 24-битным аналого-цифровым преобразователем, имеют недостаточное время записи (всего 4 мин при частоте оцифровки 100 точек в секунду в каждом пункте) и уровень собственного шума датчика и цифрователя, маскирующий сигнал сейсмического шума на частотах ниже примерно 1 Гц. Сейсмический шум помогает получить важную информацию о пространственном распределении движений грунта и структуре осадочного чехла, и очень важно провести его повторные измерения на территории Алматы с применением отвечающей условиям регистрирующей системы и большим временем регистрации в каждой точке.

2. Численное 1D моделирование реакции в пункте. Расчет реакций грунта с помощью одномерных моделей позволяет оценить фундаментальную резонансную частоту и более высокие гармоники в пунктах, что было использовано для более уверенной интерпретации результатов анализа данных по шумам и землетрясениям. По результатам моделирования получены карты фундаментальной и резонансных частот для территории г.Алматы путем интерполяции результатов 1D расчетов в пунктах расположения станций сильных движений и точках измерения сейсмического шума. Карта для случая фундаментальной частоты приведена на рис.2.

3. Реакция в пункте по результатам анализа записей станций сильных движений. Записи сильных движений локальной алматинской сети (ГУ СОМЭ МОН РК) обрабатывались после фильтрации полосовым фильтром (Баттерворта) с угловыми частотами 0.1-25 Гц. Спектры Фурье рассчитывались для трех компонент

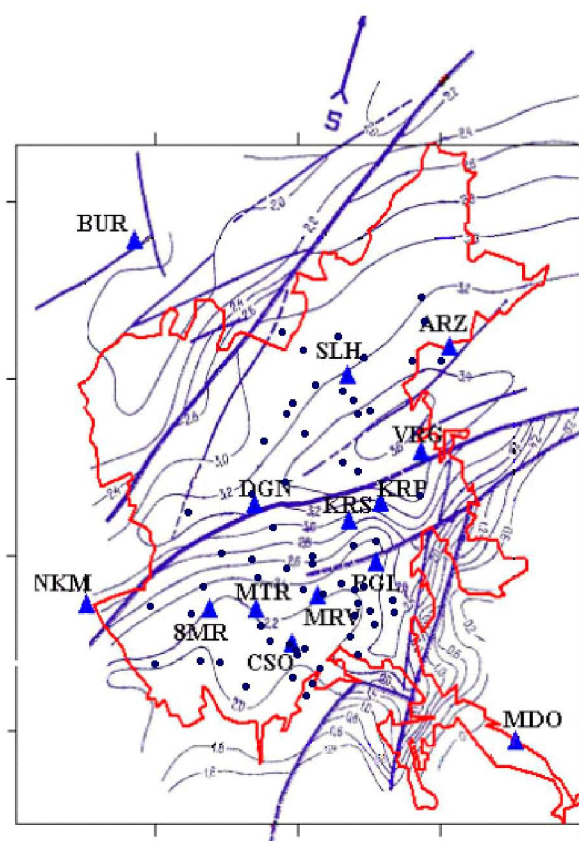


Рис.1 Точки измерений шумов на территории Алматы

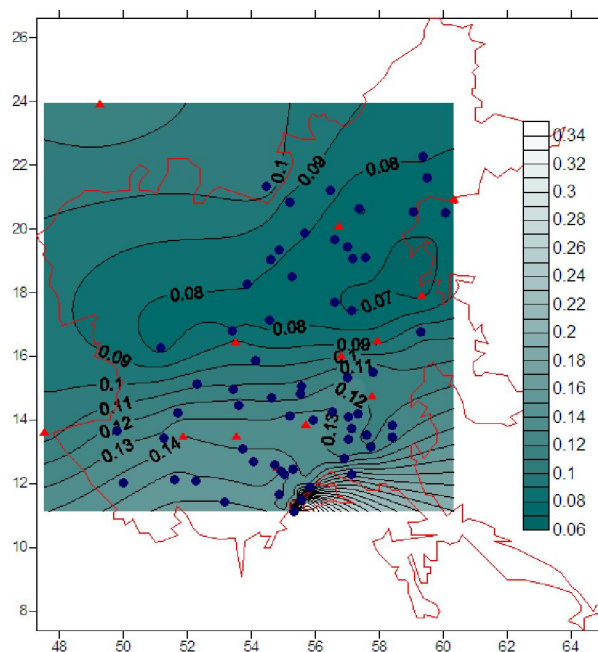


Рис.2 Карта распределения фундаментальной частоты

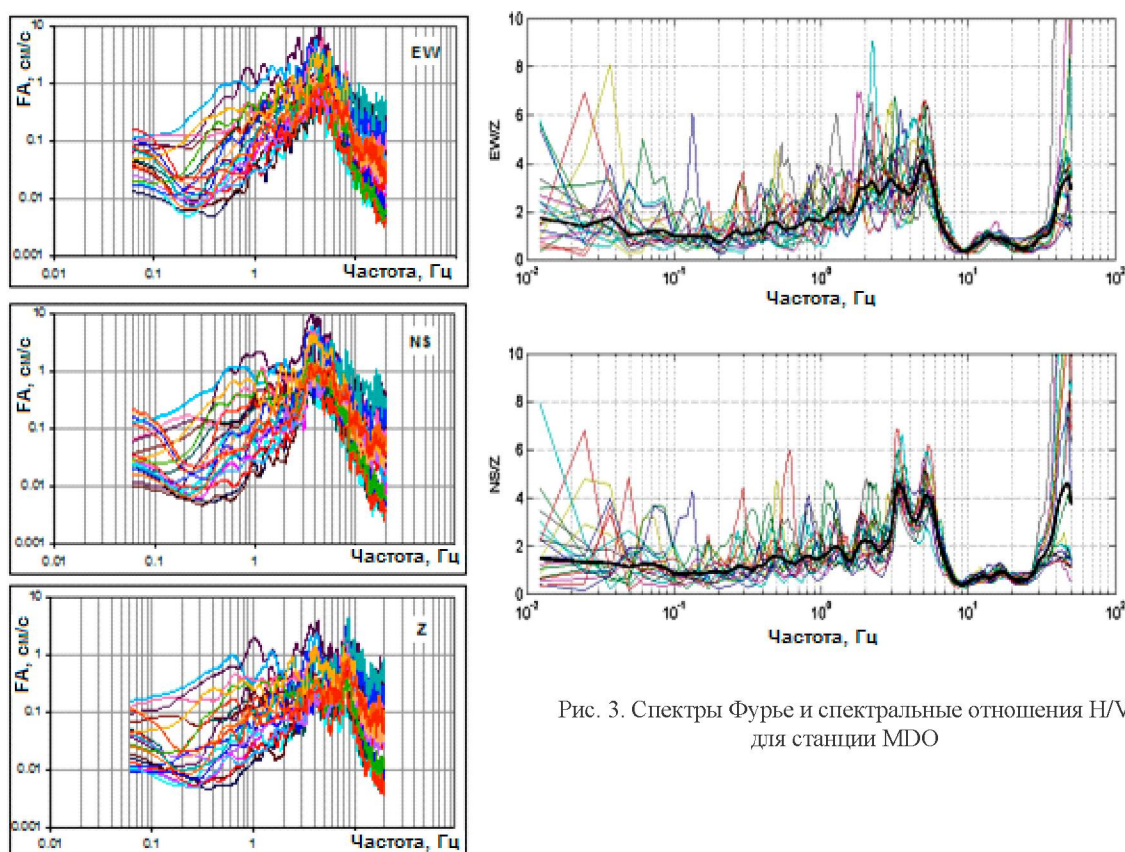


Рис. 3. Спектры Фурье и спектральные отношения H/V для станции MDO

движений грунта. Для каждого события рассчитывались, во-первых, спектральные отношения горизонтальной компоненты к вертикальной (EHV), которые усреднялись для каждой станции по всем имеющимся записям. Во-вторых, рассчитывались стандартные спектральные отношения (SSR) относительно опорной станции и также усреднялись по всем имеющимся записям для каждой из станций. В качестве опорной использовалась станция MDO, расположенная в пределах города на выходе скального грунта.

Геологический разрез в районе MDO представлен выходом верхнепалеозойских пород, выветрелых и трещиноватых в верхней части. Грунты в районе станции отнесены к I категории по сейсмическим свойствам [5].

Нужно отметить (рис. 3), что EHV на станции MDO, полученное усреднением результатов по 22 событиям показывает усиление на частотах между примерно 2 и 6 Гц, возможно из-за топографических условий или выветрелости верхних скальных слоев [3]. Датчик расположен на первом этаже двухэтажного здания на изолированном бетонном постаменте. По-видимому, такой способ установки приводит к сильному уси-

лению в высокочастотной части спектра (на 40-50 Гц) (рис.3). Эти недостатки выбора опорной станции принимаются в расчет при обсуждении результатов. Также нужно иметь в виду, что из-за преобладания собственного шума датчика в низкочастотном диапазоне (рис.3) результаты могут интерпретироваться только на частотах выше 0.1-0.2 Гц.

Спектральные отношения SSR и EHV сравнивались с теоретическими 1-D функциями отклика в пунктах. В целом эмпирические функции отклика характеризуются более сложной формой, чем теоретические. Конечно, это может быть результатом принятых упрощений при построении 1-D модели или эффектов, вызываемых отличным от вертикального распространением SH волн. Для лучшего понимания причин различия эмпирических и теоретических результатов исследованы волновые формы скорости, записанные на разных станциях в сравнении с записями на станции MDO. Результаты показали, что невозможно объяснить различие волновых форм и спектрального состава только исходя из местоположения станций или магнитуды событий. Необходимо более детальный анализ.

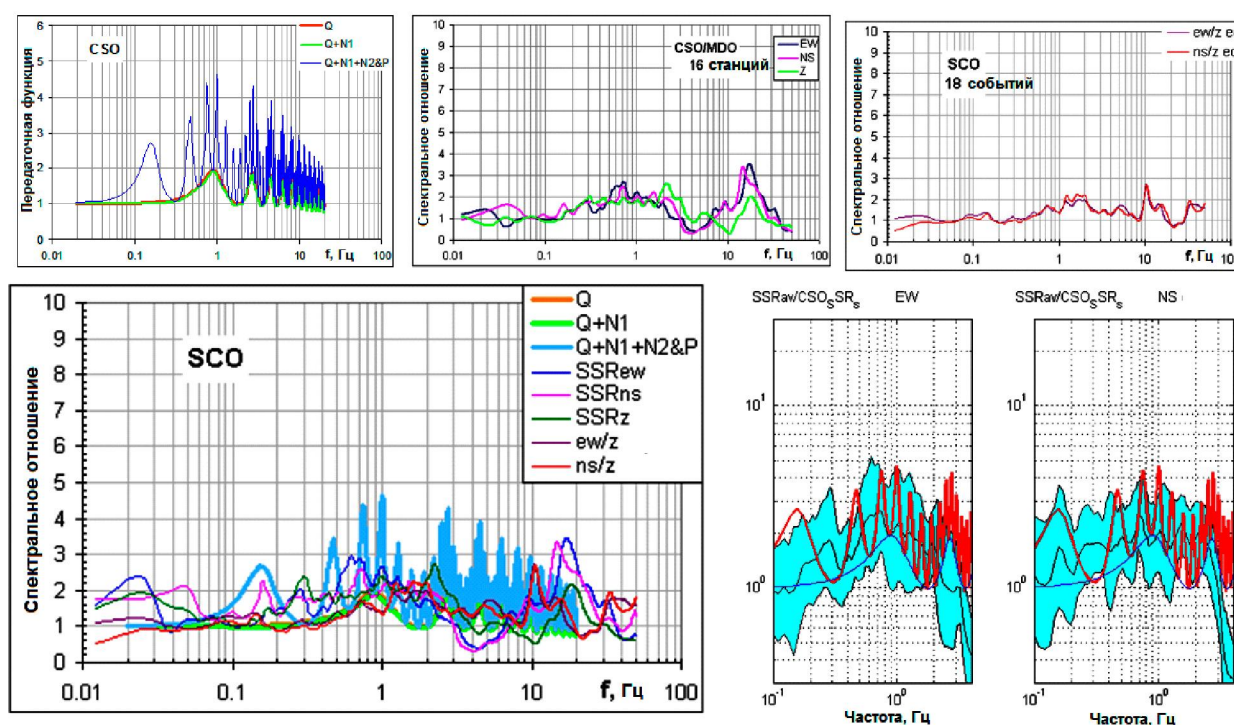


Рис. 4. Модель и эмпирические функции отклика для станции CSO. В левый нижний график включены среднеарифметические кривые SSR, в правый – среднегеометрические SSR со стандартными отклонениями для горизонтальных компонент

Станция CSO расположена в зоне конуса выноса реки Большая Алматинка. Верхнюю часть разреза составляют суглинки небольшой мощности – 2-3 м, подстилаемые мощной толщей валунно-галечников. Грунтовые воды лежат на глубине более 10 м. Сейсмическая зона по действующей карте сейсмического районирования соответствует 9 баллам по шкале MSK-64. Категория грунтов по сейсмическим свойствам – II. Мощность четвертичных отложений – 220 м, мощность осадочного чехла – 1960 м.

На рис.4 показаны полученные функции отклика для станции CSO. В этом случае стандартное спектральное отношение SSR относительно станции MDO получено геометрическим осреднением по 16 событиям, а EHV – по 18 событиям.

По результатам теоретического 1D моделирования функция отклика станции CSO имеет фундаментальную частоту 0.16 Гц. Это близко к нижней границе частот, которые можно интерпретировать по эмпирическим данным. Пик, создаваемый границей между четвертичными и верхнеогеновыми отложениями ожидается на 0.90 Гц.

Эмпирические функции отклика SSR и EHV для станции CSO в целом дают относительно

низкое усиление в два раза при более высоких значениях, даваемых SSR на 0.5-0.8 Гц. Обращает внимание усиление вертикальной компоненты спектров CSO, объясняющее, почему кривые EHV дают более низкий уровень усиления по сравнению с SSR [2]. Также можно видеть, что на разных горизонтальных компонентах пики усиления наблюдается на несколько различающихся частотах.

Эмпирические кривые отклика в пункте дают большее количество спектральных пиков и больших областей усиления, чем теоретическая. Это может объясняться 1) чрезмерным упрощением при моделировании распространения SH волн, 2) горизонтальной неоднородностью структуры, геометрией бассейна и наличием разломов, которые могут вызвать эффекты дифракции и рассеяния, осложняющие волновое поле, генерируя локальные поверхностные волны. Этим, в частности, может определяться и усиление вертикальной компоненты движений грунта. Влияние системы разломов преимущественно северо-западного простирания на наблюдаемые движения грунта было бы интересно исследовать в будущем.

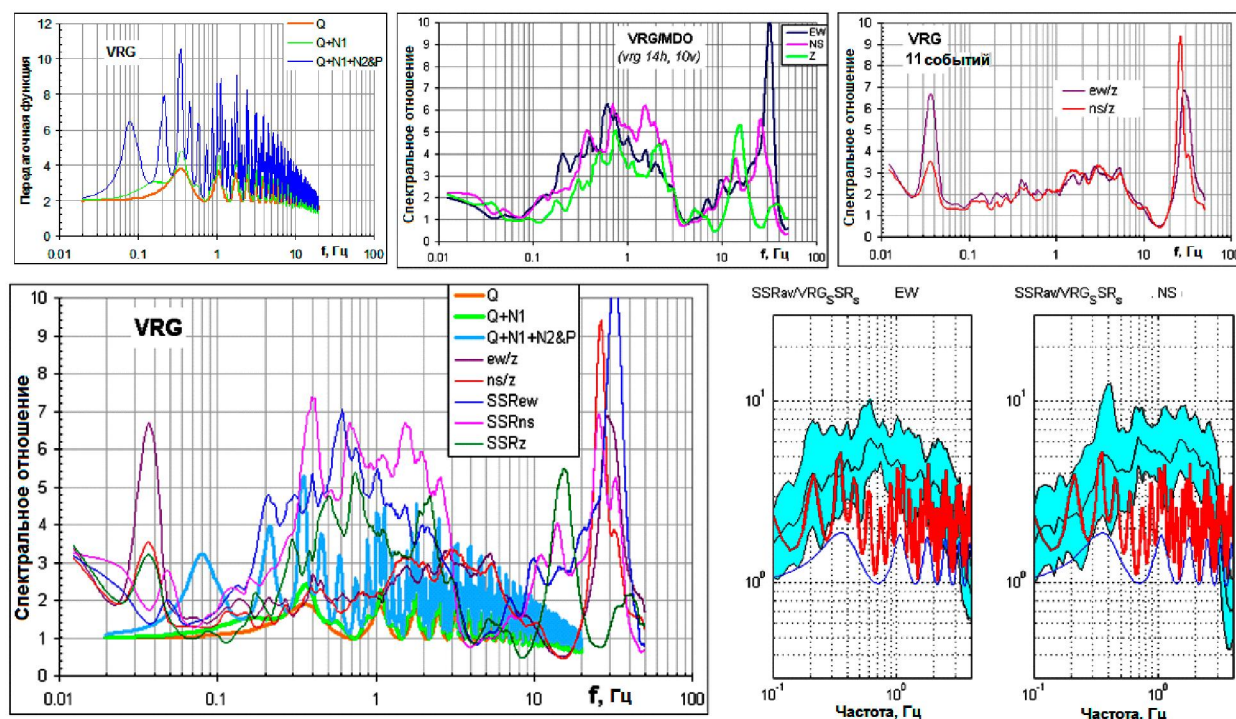


Рис. 5. Модель и эмпирические функции отклика для станции VRG

Станция VRG расположена в районе наибольшей мощности осадочного чехла (3600 м) на территории города. Верхняя часть разреза 20 м представлена переслаиванием обводненных суглинков, супесей и песка с прослоями гравия и галечника (III категория грунтов по сейсмическим свойствам). Мощность четвертичного слоя в районе расположения станции составляет 360 м.

На рис. 5 представлены теоретическая 1D модель реакции в пункте вместе с средним (по 14 событиям) SSR и EHV (по 10 событиям) для станции VRG.

Согласно 1-D модели фундаментальная частота для станции VRG ожидается на 0.078 Гц, что попадает в диапазон частот, где нет возможности интерпретировать эмпирические данные. Частота максимального пика, даваемого границей четвертичных отложений – 0.35 Гц. Значения усиления, даваемые SSR (от 3 до 6 раз на частотах выше 0.18 Гц) значительно превышают теоретическое усиление, а также и усиление, полученное для станции CSO. Значительное усиление снова проявляется не только на горизонтальных, но и на вертикальной компоненте движений грунта, что приводит к сильной недооцен-

ке усиления на кривых EHV во всем изучаемом диапазоне (0.7-1.7 Гц). На обоих графиках SSR и EHV присутствует аномально большой пик в районе частоты 30 Гц, очевидно связанный (как отмечалось ранее) с вибрацией колонообразного бетонного постаменты, на который устанавливается датчик для изоляции его от влияния здания.

Пик за счет скачка акустической жесткости на границе четвертичных отложений и неогена невозможно четко выделить на SSR, так как он лежит в широкой области повышенного усиления. Сходство и различие эмпирических и теоретических данных объясняется аналогично случаю CSO.

В районе расположения станции BUR общая мощность чехла составляет 2200 м, мощность четвертичных отложений всего 70 м. Практически весь осадочный чехол состоит из валунно-галечника. Однако валунно-галечники здесь недостаточно плотные, так как станция лежит в северной периферийной части конуса выноса, где уменьшаются степень цементации, размер и процентное содержание крупнообломочных фрагментов, и появляются прослои супесей-суглинков. Самая верхняя десятиметровая часть раз-

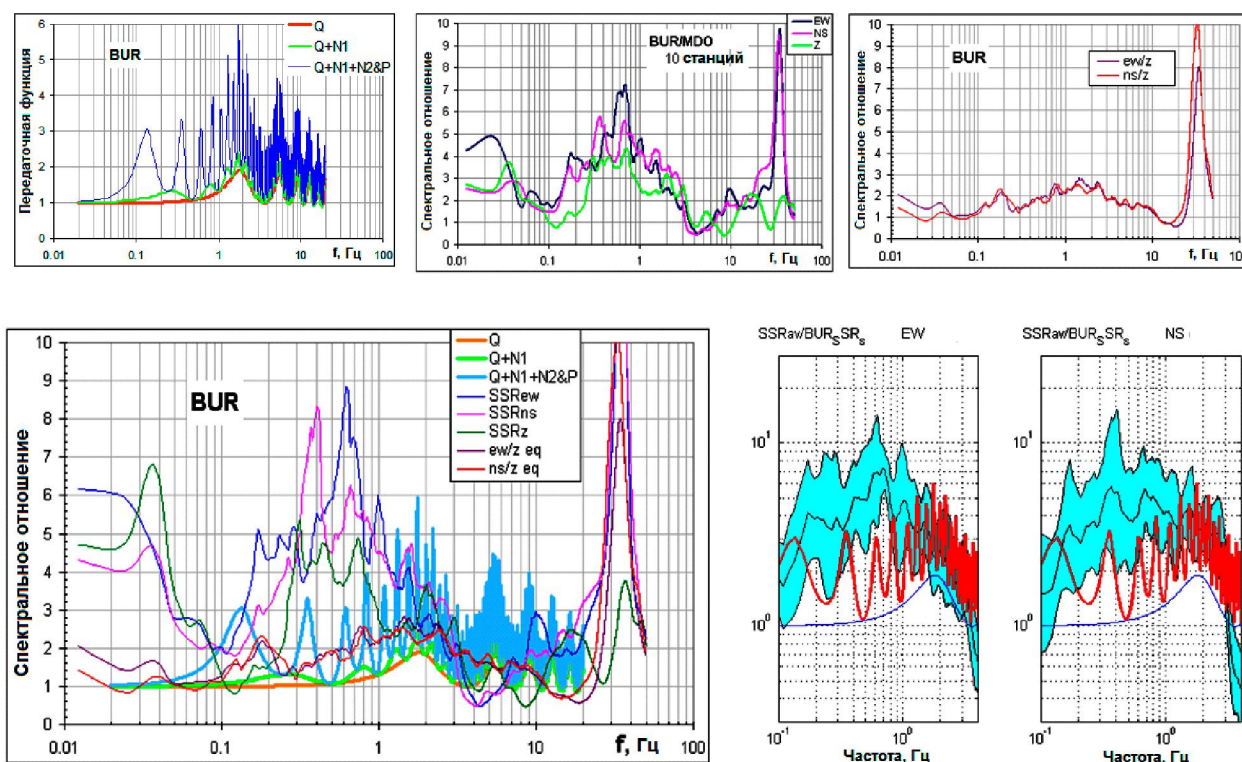


Рис. 6 Модель и эмпирические функции отклика для станции BUR

реза представлена суглинками. Грунтовые воды залегают на глубине более 5 м. Сейсмическая зона по СМР – 8 баллов. Категория грунтов по сейсмическим свойствам – II-III.

SSR (среднее по среднее по 10 событиям) и ENV (среднее по 14 событиям) для станции BUR представлены на рис. 6.

Согласно рассчитанному теоретическому отклику фундаментальная частота для этой станции ожидается на 0.14 Гц. Четвертичный пик ожидается на частоте 1.82 Гц. В целом средний уровень усиления на этой станции превышает значения на CSO и других станциях, расположенных на конусах выноса. На SSR наблюдаются пики 6-7 кратного усиления в диапазоне частот 0.16-1.7 Гц. Как и в предыдущих случаях график SSR показывает усиление вертикальной компоненты, горизонтальные компоненты не всегда согласованы. Сходство и различие эмпирических и теоретических данных объясняется аналогично случаю CSO.

Выводы. Во всех трех случаях, рассмотренных при эмпирическом анализе данных, отмечено усиление уровня колебаний в диапазоне 0.2-3 Гц и более сложные формы функций откли-

ка в пунктах, чем полученные при простом 1D численном моделировании. Усилению подвержены как горизонтальные, так и вертикальная компоненты. На горизонтальных компонентах внутри одной станции могут проявляться очевидные эффекты направленности. Выделяется пик, прогнозируемой 1-D моделью для скачка акустической жесткости на границе четвертичного слоя, но на станциях CSO и BUR он несколько сдвинут в сторону меньших частот. Пик, соответствующий фундаментальной частоте пункта, определяется на станциях, расположенных на конусах выноса, но не может быть получен на станции, расположенной в районе с максимальной мощностью чехла.

Сложная форма эмпирических функций отклика и сильное усиление вертикальной компоненты говорят о возможном наличии 2D-3D эффектов в районе Алматы. В частности тщательного исследования требует роль северо-западной ориентации разломов в захватывании энергии и изменении характера движений грунта. Такое исследование требует детального частотно-временного анализа записей сильных движений. Пример частотно-временного анализа записей

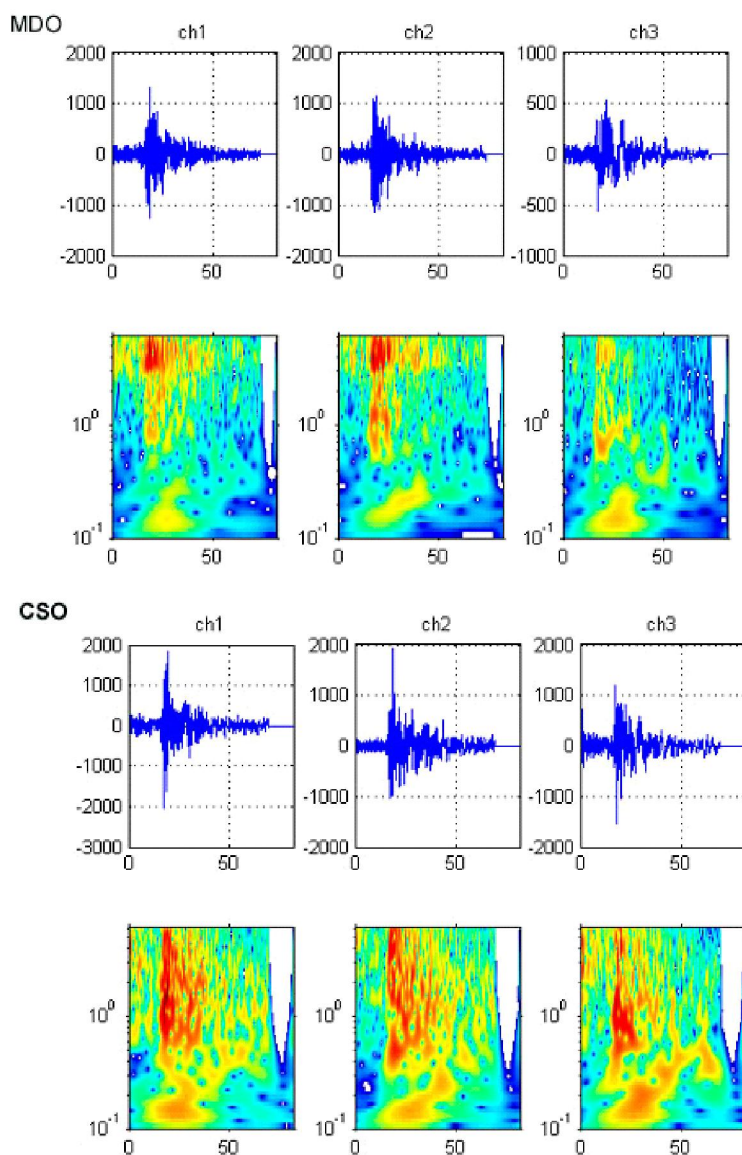


Рис. 7. Частотно-временной анализ волновых форм скорости, полученных на станциях MDO и CSO при землетрясении 25.12.2005 с магнитудой Ms 5.8 на расстоянии около 148 км от эпицентра

скорости показан на рисунке 7. На рисунке представлены S-преобразования [4] для землетрясения с магнитудой 5.8 и эпицентральной расстоянием около 150 км для станций MDO и CSO, а также сами записи, для которых оно рассчитано. Полученные образы позволяют отметить несколько интересных особенностей. На графиках для станции MDO хорошо видны три пятна, показывающие области максимального выделения энергии, которые соответствуют вкладам очагового спектра, усиления в области высоких частот и прихода низкочастотных волн в диапазоне

0.1-0.3 Гц. Поскольку эти же пятна в низкочастотной зоне присутствуют также на распределениях, рассчитанных для станции CSO, эта картинка может указывать на вступление региональной фазы. S-преобразования, полученные для станции CSO, подтверждают наличие усиления колебаний грунта в широком диапазоне частот.

Из других станций на территории города подобно CSO ведут себя станции на конусе выноса – 8MR и MTR. На графиках их спектральных отношений также можно выделить пик, соответствующий фундаментальной частоте, прогнози-

руемой при 1D моделировании, но пик даваемый границей четвертичных отложений сдвинут. На станциях SLH, ARZ и KRP, подобно VRG расположенных в зоне большей мощности осадочного чехла и четвертичного слоя, пик на фундаментальной частоте, прогнозируемый численным моделированием, не проявляется. Это может быть вызвано частотными ограничениями, налагаемыми на анализ энергетическим уровнем записываемых сигналов и собственным шумом регистрирующей системы. Четвертичный пик является преобладающим хотя бы на одной из горизонтальных компонент. Для станций KRS, NKM, лежащих в зоне резкого понижения фундамента, также можно выделить пик на фундаментальной частоте, а четвертичный пик присутствует, но уже не является максимальным. Во всех проанализированных случаях график функций спектральных отношений сложный с дополнительными пиками и широкими спектральными зонами усиления. Общий уровень усиления повышается от станций на конусе выноса к станциям в районе наиболее глубокой части бассейна.

И, наконец, учитывая неравномерность имеющихся данных вследствие немногочисленности и расположения станций сильных движений, рекомендуется получить новый набор записей

сейсмического шума на территории города. Они помогут повысить качество картирования осадочного чехла и получить пространственное распределение локальных откликов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абаканов Т., Судо К., Досымов А., Силачева Н., Кулбаева У., Льготкин Ю., Кравченко Н. Исследование сейсмических свойств грунтов по микроколебаниям на территории Алматы // Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений. Доклады второго Казахстанско-японского семинара 23-25 сент. 2002 г. Алматы, 2003. С. 387-393.
2. Parolai S. and S. M. Richwalski. The Importance of Converted Waves in Comparing H/V and RSM Site Response Estimates // Bulletin of the Seismological Society of America, 2004. Vol. 94, No. 1. P. 304-313.
3. Силачева Н.В., Кулбаева У.К., Кравченко Н.А. Локальное усиление колебаний грунта на примере г.Алматы // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. Сборник материалов Четвертого международного симпозиума. Бишкек. Кыргызстан. 15-20 июня 2008 г. Москва-Бишкек, 2009. С. 231-236.
4. Stockwell, R. G., Mansinha, L., Lowe, R. P. Localization of the complex spectrum: the S transform // IEEE Trans. Signal Processing. 1996. Vol.44, no.4, P.998-1001.
5. Строительство в сейсмических районах. СНиП РК 2.03-30-2006. Алматы, 2006. 80 с.
6. Шацков В.И. Методика исследований при оценке сейсмической опасности территории. Алма-Ата.: Наука КазССР, 1989. 207 с.