

Резонансные свойства верхней части разреза

А.Ф. Еманов, А.А. Красников, А.А. Бах, Е.Н. Черных¹,
А.А. Еманов², А.Ю. Семин, А.В. Черепанов³

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, 664033, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

³ ООО «ЮЖКузбассТИСИЗ», Новокузнецк, 654099, Россия

С использованием свойства когерентности во времени стоячих волн, формирующихся в слоистой среде, разработана методика изучения резонансных свойств верхней части разреза на заданной площадке с контролируемой точностью. По результатам экспериментальных работ в г. Осинники (Кемеровская обл.) определены резонансные частоты разреза и построены карты усиления колебаний на собственных частотах и карты точности определения коэффициентов усиления колебаний. На поверхности площадки мы наблюдаем серию узких (десятые доли Гц) резонансов, связанных с формированием стоячих волн в слоистой среде. Переход от карт прироста бальности, не зависящих от частоты (существующие методики микросейсмического районирования), к серии карт на резонансных частотах (данная методика) позволяет точнее оценить сейсмостойкость зданий разной этажности, обладающих разными собственными частотами.

Resonance properties of the upper part of the geological section

A.F. Emanov, A.A. Krasnikov, A.A. Bakh, E.N. Chernykh¹, A.A. Emanov²,
A.Yu. Semin, and A.V. Cherepanov³

Altai-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

¹ Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, 664033, Russia

² Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

³ Southern Kuzbass Enterprise of Civil Engineering Surveying Ltd., Novokusnetsk, 654099, Russia

Using the time coherence of stationary waves generated in a layered medium we develop a technique of studying resonance properties of the upper part of the geological section on a given area with controlled accuracy. By the experimental findings obtained in Osinniki town (Kemerovo region) we determine resonance frequencies of the section, draw maps of oscillation enhancement at eigenfrequencies, and check the accuracy of determining the oscillation enhancement coefficients. On the area surface we observe a series of narrow (a few tenth of Hz) resonances associated with stationary wave generation in the layered medium. The change from frequency-independent maps of seismic magnitude increase (conventional microseismic risk zoning methods) to resonance frequency maps (our method) allows evaluating more accurately the earthquake resistance of buildings with different number of storeys and different eigenfrequencies.

1. Введение

Исследование резонансных свойств верхней части разреза является составной частью сейсмического микрорайонирования. На данный момент методику сейсмического микрорайонирования составляют три подхода [1, 2]. Первый из них — прямой метод — требует проведения регистрации на заданной площадке землетрясений в достаточно большом количестве точек. Данный метод принято считать наиболее точным, но он является наиболее дорогостоящим и, как правило, используется

при измерениях по редкой сети точек на площадке, где проводятся другие виды измерений. В некоторых случаях, когда сроки проведения работ по микросейсмическому районированию совпадают с афтершоковыми процессами крупных землетрясений, прямой метод становится существенно дешевле и используется как единственный в составлении карт сейсмического микрорайонирования [3]. Второй метод [1, 2] — косвенный — основан на изучении скоростных характеристик верхней части разреза и расчете усиления сейсмических колебаний от

землетрясений верхней частью разреза. Такие исследования в виде штрихов покрывают площадку и, являясь опорными, обладают недостаточной детальностью изучения площадки. В то же время, именно исследование верхней части разреза обеспечивает получение информации для математического моделирования сейсмических воздействий (расчета акселерограмм), в результатах которого данные сейсмического микрорайонирования органически соединяются с результатами сейсмического районирования [4, 5]. Третий метод — микросейсмический — основан на существовании связей между интенсивностью микросейсмических колебаний и усилением колебаний от землетрясений на заданной площадке. В настоящий момент исследование микросейсм в решении задач сейсмического микрорайонирования стало широко применяться как детальный и дешевый метод исследования с низкой точностью, опирающийся на менее детальные, но более точные результаты других методов сейсмического районирования.

В данной работе мы рассмотрим возможности исследования резонансных свойств верхней части разреза по измерениям микросейсмических колебаний. Изменение в пространстве резонансных свойств верхней части разреза играет значительную роль в усилении колебаний от землетрясений и может внести значительный вклад в развитие сейсмического микрорайонирования. Основная идея — не ориентироваться на существующие методики микросейсмических измерений, а разработать новую методику, опирающуюся на универсальный метод выделения когерентных по параметру волн из регистрируемых колебаний [6].

В инженерной сейсмологии используются когерентные во времени сигналы [6–9], являющиеся составной частью микросейсмического шума. Следует отметить, что, говоря о когерентности, необходимо получить ответы на вопросы: по какому параметру мы оцениваем когерентность и между какими характеристиками волнового поля ее вычисляем? По сути своей, исследователи часто рассматривают принципиально разные составляющие волнового поля, используя аппарат изучения когерентных процессов.

Успех в развитии метода стоячих волн [8] в исследовании сейсмостойких зданий позволяет надеяться на перспективность применения данного метода в микросейсмическом районировании.

Природа микросейсм разнообразна, но в их составе имеются стоячие волны, формирующиеся по причине существования интерференции волн, многократно отраженных в верхней части разреза сигналов. Стоячие волны, обладая свойством когерентности во времени, могут быть выделены в чистом виде из зарегистрированных колебаний и могут трансформироваться по времени, что позволяет из разновременных наблюдений микросейсм получать одновременные записи стоячих волн.

Выделить стоячие волны из записей микросейсм реально в том случае, когда когерентность высока, т.е. стоячие волны должны вносить значимый вклад в регистрируемое волновое поле.

Если брать в целом микросейсмический метод в инженерной сейсмологии [1, 2, 10–12], то в его арсенале использование шумов транспортных средств, поверхностных волн, сейсмических сигналов промышленных установок и т.п. В предлагаемой методике мы рассматриваем один тип волн — стоячие волны, но при этом будем стремиться к существенному повышению точности и детальности исследований, используя отличительную черту стоячих волн — свойство когерентности во времени.

Прежде чем приступить к изложению метода изучения стоячих волн в верхней части геологического разреза, кратко рассмотрим основы существующих методик измерений в микросейсмическом районировании.

2. Микросейсмические измерения в сейсмическом микрорайонировании

Отметим, что в инженерной сейсмологии к математической модели микросейсм, регистрируемых в точке, подходят как к сумме сигналов от большого количества источников плюс спонтанные микросейсм [2]:

$$S_M(\omega) = \sum_{i=1}^m S_{iM}(\omega) + S_{SM}(\omega), \quad (1)$$

где $S_{iM}(\omega)$ — спектр волн от i -го источника; $S_{SM}(\omega)$ — спектр спонтанных микросейсм. Понятие спонтанных микросейсм было введено Е.Ф. Саваренским. Если провести измерение микросейсм в тихой местности, удаленной от источников шума, например в пустыне Гоби, то и там регистрируются колебания земной поверхности. Эти колебания были названы спонтанными микросейсм. Предполагалось, что этот тип микросейсм представляет собой Р-волны, падающие на основание низкоскоростного поверхностного слоя. Наиболее часто в выражении (1) в качестве полезного сигнала в микросейсмическом районировании используют спонтанные микросейсм, а сумма сигналов от множества других источников относится к разряду помех.

В этом случае для микросейсмического районирования используют одну эталонную точку и множество подвижных. Задача сводится к тому, чтобы определить усиление верхней частью разреза спонтанных микросейсм. Экспериментально установлено [2], что усиление спонтанных микросейсм верхней частью разреза и усиление объемных волн от землетрясений соответствуют друг другу. В соответствии с моделью (1) для сравнения сейсмической реакции грунта во множестве точек необходимо выделить спектры спонтанных микросейсм в каждой из точек и поделить их на спектр спонтанных микросейсм для точки на эталонном грунте.

Фактически используется осреднение спектров микросейсм по времени для уменьшения ошибки, но данный прием не всегда эффективен и микросейсмический метод оправдано считается методом с низкой точностью. При отсутствии источников шума метод может давать хорошие результаты, но при этом нет защиты от локальных источников шума. Возникающие при этом ошибки могут быть велики.

При исследованиях с помощью микросейсм были получены выражения для расчета приращения бальности:

$$\Delta I = 2 \lg \frac{A_M}{A_0}$$

для условий Камчатки, а для условий аймачных центров Монголии Е.Н. Черных обосновал коэффициент 1.6 в данном выражении. Существует мнение, что для разных региональных условий связь между приращением бальности и соотношением амплитуд микросейсм может различаться. По измерению микросейсм часто дают не приращение бальности, а карты изменения интенсивности относительно эталонного грунта [2].

В рамках модели (1) получила развитие методика использования для микросейсмического районирования некоторых типов источников шума. Использовались вынужденные периодические колебания (вибрации), которые создают источники возбуждения с известной закономерностью изменения возмущающей силы [2]. Фактически один из источников шума в выражении (1) переводится в разряд полезного сигнала. В качестве такого источника использовались движущийся тепловоз, агрегаты ГЭС, ТЭЦ, тяжелые прессы, молоты заводского оборудования, а также низкочастотные штормовые микросейсм. Желаемым сигналом для экспериментов в микросейсмическом районировании был многие годы сигнал вибратора с изменяющейся во время сеанса вибрации частотой.

К недостаткам микросейсмических измерений с опорной точкой следует отнести трудности, возникающие при выделении полезного сигнала, — спонтанных микросейсм или вынужденных колебаний определенного типа из зарегистрированного шума. Хотя данный метод широко применяется в практике сейсмического микрорайонирования, не существует методов оценки точности результата и не разработано способов надежного подавления помех, вносящих систематические ошибки в результат. Для повышения точности результатов используют осреднение по времени и сглаживание по частоте, что фактически уменьшает детальность информации о резонансных свойствах верхней части разреза.

Кроме измерений микросейсм с опорной точкой, широкое распространение в практике получил метод Накамуры [13], в котором для оценки частотных характеристик грунтов используется отношение между спек-

рами горизонтальных и вертикальных компонент. Экспериментами доказано, что метод позволяет компенсировать спектральные компоненты колебаний, являющиеся техногенным шумом, и получать более надежные результаты при выполнении микросейсмического районирования в условиях высокого уровня техногенных шумов.

В методе Накамуры передаточные функции рассчитываются как

$$U(x) = (H_N + H_E)/2V_Z,$$

где H_N и H_E — спектры микросейсм по горизонтальным компонентам «север — юг» и «восток — запад»; V_Z — спектр по вертикальной компоненте. Далее определяются частоты максимумов передаточных функций и для этих частот считаются приращения сейсмической интенсивности по формуле:

$$\Delta I = K \lg(U_s/U_r),$$

где U_s и U_r — максимальные значения передаточных функций на исследуемом и эталонных грунтах.

Данный метод имеет эмпирическое обоснование и меньше других методов подвержен искажающему влиянию промышленных шумов, но строгого физико-математического обоснования этого метода нет, как нет оценки точности результатов. В методе Накамуры используется сильное сглаживание по частоте и дается оценка максимального усиления колебаний без зависимости от частоты, как и в методе с опорной точкой.

3. Теоретические основы микросейсмического районирования методом стоячих волн

В слоистой среде формируются многократные отражения внутри слоев, и их интерференция приводит к формированию стоячих волн. Еще в девятнадцатом веке была доказана общеизвестная теорема [11, 14, 15] о независимости решения по стоячим волнам от начальных условий. Для слоистой среды это означает, что стоячие волны, формирующиеся в них, не зависят от источника колебаний. Для поля стоячих волн не важно, где размещен и какого типа источник используется.

Опираясь на данную теорему, можно сказать, что детальность и точность исследования стоячих волн в верхней части разреза должны быть одинаковы и не зависят от того, изучаем мы микросейсмические колебания или применяем высокостабильные по излучению искусственные источники колебаний. До последнего времени в экспериментах по микросейсмическому районированию измерения на основе микросейсмических шумов обоснованно считались менее точными, чем исследования с искусственными источниками. Дело в том, что принципиальные возможности метода и практическая реализация не всегда совпадают.

В данной работе обоснована методика наблюдений за микросейсмскими, создана математическая модель вол-

нового поля, построены алгоритмы, позволяющие выделить стоячие волны в чистом виде и преобразовывать их из разновременных наблюдений в одновременные записи стоячих волн на плотной системе наблюдений, покрывающей заданную площадь.

Колебания для каждой из нормальных мод стоячих волн описываются выражением [11]:

$$\Psi(x, y, z, t) = A(x, y, z) \cos(\omega_m t + \varphi_{x,y,z}), \quad (2)$$

где $A(x, y, z)$ — геометрическая форма стоячей волны; $\varphi_{x,y,z}$ — фаза колебаний в заданной точке для конкретной нормальной моды; ω_m — частота собственных колебаний.

Геометрическая форма стоячей волны, фаза и частота собственных колебаний зависят от геометрии слоя и физических параметров грунта или горной породы. При детальном измерении по поверхности земли параметров каждой из стоячих волн мы можем изучить резонансные свойства верхней части разреза. Стоячие волны являются резонансами слоев и при многослойном строении разреза должны обнаруживаться резонансы этих слоев на разных частотах.

Из уже упомянутой теоремы вытекает важное свойство когерентности во времени колебаний в стоячих волнах. По стоячим волнам линейная связь между записями колебаний двух точек не зависит от времени. И эта связь выполняется как для амплитуд, так и для фаз стоячих волн.

Для изучения стоячих волн необходимо решить два актуальных вопроса. Если мы установим сейсмоприемник на дневной поверхности, то будем регистрировать сумму стоячих и бегущих волн. Первый вопрос: как выделить из регистрируемых колебаний стоячие волны? Детальное изучение стоячих волн для микросейсмического районирования требует плотных систем наблюдений. Второй вопрос: как обойтись для изучения стоячих волн на плотной системе наблюдений измерениями с малокаанальной аппаратурой?

Основу решения поставленных задач составил метод восстановления когерентных составляющих сейсмических волновых полей [6–8], позволяющий выделять когерентные волны из экспериментально наблюдаемых волновых полей. В упомянутой работе введено понятие когерентности по параметру. Дело в том, что когда мы говорим о линейной связи между сейсмическими записями, то независимой она может быть от любого параметра, например по измерению в пространстве, по элементам системы наблюдений, по площади, по энергии и т.п. Когерентность по времени — это частный случай когерентных сигналов.

Рассмотрим следующую систему наблюдений и ее возможности. Одновременная регистрация микросейсм ведется в опорной точке и i -й точке (группе точек), затем i -я точка (группа точек) меняет свое положение и вновь проводится регистрация сейсмических колебаний одно-

временно с опорной точкой. Такими наблюдениями можно детально покрыть исследуемый объект с малокаанальной аппаратурой. Именно такая система наблюдений принята при микросейсмическом районировании на микросейсмах в [1, 2]. Отличительными чертами являются, во-первых, отношение к опорной точке, во-вторых, модель волнового поля и алгоритмы обработки измерений.

Задача состоит в том, как преобразовать разновременные наблюдения в разных точках наблюдений в одновременную запись стоячих волн на всей системе наблюдений. Для решения этой задачи необходима математическая модель колебаний.

Вернувшись к модели (1), обратим внимание, что она не содержит в себе информации о стоячих волнах и на ее основе нет возможности построить алгоритмы обработки стоячих волн. Для разработки алгоритмов выделения стоячих волн необходимо изменить саму модель сейсмической записи в методе микросейсм.

Общеизвестно, что если рассматривать решение волнового уравнения в слое для произвольного источника колебаний, то решение разлагается на два слагаемых. Одно описывает бегущие волны, а другое — стоячие. Фактически мы имеем бегущие волны от множества источников и единое поле стоячих волн в верхней части разреза. Каждый источник колебаний обеспечивает подкачку энергии в единое колебание стоячих волн, которое происходит независимо от параметров источников. Для стоячей волны в слое характерна зависимость ее характеристик от геометрии границ слоя и скоростных характеристик осадков. Изменение характеристик стоячих волн описывает особенности изменений резонансных свойств верхней части разреза и позволяет решать задачи микросейсмического районирования.

Для разработки модели сигналов, регистрируемых на поверхности грунта, представим колебания каждой точки как сумму двух составляющих. Первая составляющая — стоячие волны, а вторая — бегущие волны.

Заложим в основу модели сейсмических колебаний верхних слоев разреза следующие предположения.

– При воздействии микросейсмических колебаний на слоистую толщу верхней части разреза отличия формирующихся в ней стоячих волн, зарегистрированных в двух произвольных точках, описываются линейной системой, характеристика которой не зависит от времени.

– При воздействии микросейсмических колебаний на слоистую толщу верхней части разреза отличия бегущих волн, зарегистрированных в двух произвольных точках, не могут быть описаны линейной системой, характеристика которой не зависит от времени.

– Линейные связи в изменениях стоячих волн, регистрируемых в двух точках, существуют для каждой пары одноименных компонент регистрируемых колебаний.

Третье предположение существенно упрощает поставленную задачу. Вместо того чтобы работать с векторными сигналами с девятью характеристиками связи, мы будем работать с данными регистрации по каждой из компонент колебаний независимо друг от друга и обойдемся тремя характеристиками связи.

Модель связи колебаний, регистрируемых в двух разных точках на поверхности грунта, примет вид:

$$\begin{aligned}\bar{F}_0(t) &= F_0(t) + W_0(t), \\ \bar{F}_i(t) &= F_0(t)h_{0i}(t) + W_i(t),\end{aligned}\quad (3)$$

где $h_{0i}(t)$ — импульсная характеристика линейной системы, описывающей связь между одновременными записями стоячих волн в точках 0 и i на заданной площадке; $W(t)$ — бегущие волны; $F_0(t)$ — запись стоячей волны в опорной точке.

Подход к обработке инженерно-сейсмологических данных, рассматриваемый в этой статье, является развитием работ [7, 8], ориентированных в основном на изучение стоячих волн в инженерных сооружениях. Сравнивая (1) и (3), можно понять, что микросейсмический метод и метод стоячих волн в микросейсмическом районировании принципиально отличаются по виду модели сигналов, заложенных в основу создания алгоритмов обработки.

Для модели (3) процесса колебаний верхней части разреза есть возможность получить одновременные записи стоячих волн из разновременных последовательных наблюдений с опорной точкой. Процедура обработки в таком случае сводится к следующим операциям:

- нахождение частотных характеристик линейных систем $h_{0i}(\omega)$;
- запись или формирование независимой реализации процесса колебаний опорной точки при сейсмическом воздействии на исследуемый объект;
- пересчет стоячих волн из опорной точки с использованием $h_{0i}(\omega)$ во все точки обследуемого объекта.

Ключевым вопросом рассматриваемой схемы является задача определения $h_{0i}(\omega)$ с необходимой точностью по записям микросейсмических колебаний. Рассматривая модель сигналов, регистрируемых в двух точках площадки на одинаковых компонентах, можно видеть, что задача определения $h_{0i}(\omega)$ сводится к определению характеристики линейной системы по сигналам на ее входе и выходе, зарегистрированных на фоне шумов. Фактически необходимо определить характеристику фильтра, обеспечивающего наилучший пересчет стоячих волн из опорной точки в i -ю. Будем искать характеристику $h_{0i}(\omega)$ в виде оптимального фильтра Винера [16], преобразующего сигнал $\bar{F}_0(t) = F_0(t) + W_0(t)$ в запись стоячей волны в точке i . Для этого необходимо минимизировать по $h_{0i}(t)$ математическое ожидание квадрата ошибки между сигналом $\bar{F}_0(t)$, пропущенным через фильтр, и сигналом $F_i(t)$, являющимся выходом линейной системы [7]:

$$M \left| F_i(t) - \bar{F}_0(t)h'_{0i}(t) \right|^2 = \min. \quad (4)$$

Взяв производную по $h'_{0i}(t)$ от данного выражения и приравняв ее нулю, получим:

$$M[F_i(t)\bar{F}_0(t-\theta)] - h'_{0i}(\tau)M[\bar{F}_0(t-\tau)\bar{F}_0(t-\theta)] = 0.$$

Учитывая, что $M[F_i(t)\bar{F}_0(t-\theta)] = R_{0i}(\theta)$ — взаимная корреляционная функция между сигналами $F_i(t)$ и $\bar{F}_0(t)$, а $M[\bar{F}_0(t-\tau)\bar{F}_0(t-\theta)] = R_{00}(\tau-\theta)$ — автокорреляционная функция колебаний, зарегистрированных в опорной точке, получим

$$R_{0i}(\theta) - h'_{0i}(\tau)R_{00}(\tau-\theta) = 0. \quad (5)$$

Осуществив преобразование Фурье и перейдя в частотную область, получим:

$$h'_{0i}(\omega) = \frac{R_{0i}(\omega)}{R_{00}(\omega)} = \frac{M[F_i(\omega)\bar{F}_0^*(\omega)]}{M[\bar{F}_0(\omega)]^2}. \quad (6)$$

В знаменателе выражения (6) стоит усредненный квадрат модуля спектра колебаний в опорной точке. Решив, каким образом осуществляется усреднение, можно осуществить его вычисление. В числителе выражения (6) стоит усредненный взаимный спектр колебаний в опорной точке и стоячей волны — в i -й точке. $F_i(t)$ экспериментально не измеряется. Приняв, что $W_0(t)$ и $W_i(t)$ являются стационарными случайными процессами, не коррелированными друг с другом и с записями стоячих волн в опорной и i -й точках, легко доказывается, что [16]

$$\begin{aligned}M[F_i(\omega)\bar{F}_0^*(\omega)] &= M[F_i(\omega)F_0^*(\omega)] = \\ &= M[\bar{F}_i(\omega)\bar{F}_0^*(\omega)].\end{aligned}\quad (7)$$

Выражение (7) позволяет подставить в числитель формулы (6) усредненный взаимный спектр колебаний, зарегистрированных одновременно в опорной и i -й точках.

Усреднение спектров в данной ситуации можно осуществить, разбивая реализацию колебаний, записанных одновременно, на n блоков. Разбив на неперекрывающиеся блоки запись, получаем множество реализаций, по которым можно осуществить усреднение. Формула для расчета фильтра Винера, обеспечивающего пересчет колебаний из опорной точки в i -ю, примет вид:

$$h'_{0i}(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{F}_i(\omega)\bar{F}_0^*(\omega)}{\sum_{j=1}^n |\bar{F}_0(\omega)|^2}. \quad (8)$$

Отличия частотной характеристики фильтра Винера от характеристики линейной системы, описывающей различия стоячих волн в двух точках обследуемого объекта, описываются смещенностью оценки, которая определяется отклонением математического ожидания искомой частотной характеристики от истинного ее значения. Можно показать, что

$$M[h'_{0i}(\omega)] = \frac{h_{0i}(\omega)}{1 + |W_0(\omega)|^2 / |F_0(\omega)|^2}. \quad (9)$$

В соответствии с (9) частотная характеристика фильтра является смещенной оценкой характеристики линейного фильтра, описывающего связь колебаний двух точек обследуемого объекта. Смещенность оценки выражается в регуляризации фильтра по соотношению шум/сигнал. Другими словами, фильтр запирается на частотах с низким соотношением сигнал/шум. Отметим, что оценка фазовой характеристики фильтра не смещена.

Формула (8) позволяет вести расчет характеристики фильтра с погрешностью, которая зависит от следующих параметров наблюдений: шаг дискретизации по времени Δt , длина единичного блока T , количество блоков в записи n . Выбор первых двух параметров не вызывает затруднений. Шаг дискретизации увязывается с частотным диапазоном, в котором изучается реакция объекта на сейсмическое воздействие. Длина единичного блока связана с необходимым разрешением спектрального анализа $\Delta f = 1/T$. Сложнее вопрос о количестве блоков. Расчет по формуле (8) — лишь некоторая оценка характеристики фильтра, погрешность которой зависит от количества блоков n и соотношения энергии шумов и полезных сигналов в модели (3).

Для оценки количества блоков, необходимых для обеспечения заданной погрешности фильтра, полезен спектр когерентности $\gamma(\omega)$, который можно рассчитать по записям микросейсмических колебаний в двух точках обследуемого объекта по формуле:

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|R_{0i}(\omega)|^2}{R_{00}(\omega)R_{ii}(\omega)}, \quad (10)$$

где $R_{00}(\omega)$ и $R_{ii}(\omega)$ — спектры автокорреляционной функции колебаний, записанных в опорной и i -й точках соответственно.

Применяя модель (3), получим:

$$\begin{aligned} R_{0i}(\omega) &= h_{0i}(\omega)M|F_0(\omega)|^2, \\ R_{00}(\omega) &= M|F_0(\omega)|^2 + M|W_0(\omega)|^2, \\ R_{ii}(\omega) &= |h_{0i}(\omega)|^2 M|F_0(\omega)|^2 + M|W_i(\omega)|^2. \end{aligned}$$

Эти выражения получены в предположении о независимости реализаций шумов на входе и выходе линейной системы и их некоррелированности с полезными сигналами. Подставляя полученные соотношения в (10), получим:

$$\gamma^2(\omega) = \frac{1}{(1 + \alpha_0(\omega))(1 + \alpha_i(\omega))}, \quad (11)$$

где $\alpha_0(\omega) = \frac{M|W_0(\omega)|^2}{M|F_0(\omega)|^2}$; $\alpha_i(\omega) = \frac{M|W_i(\omega)|^2}{M|F_i(\omega)|^2}$ — отношения средневзвешенных квадратов шум/полезный сигнал в опорной и i -й точках.

Из формулы (11) следует, что спектр когерентности зависит только от отношения энергии бегущих волн к энергии стоячих волн. Спектр когерентности может быть рассчитан по одновременным записям в любой паре точек обследуемой площадки. Значения $\gamma(\omega)$ лежат в диапазоне 0–1. Единица соответствует случаю, когда в двух точках регистрируются только стоячие волны. При $\gamma(\omega) = 0$ в двух точках площадки регистрируются только бегущие волны.

Для зданий экспериментально показано [7], что значения спектра когерентности на собственных частотах инженерных сооружений высоки — 0.8–0.99, а в промежутке между ними соответствуют значениям 0.1–0.3. Для верхней части разреза вряд ли можно надеяться на столь высокую роль стоячих волн в формировании общего микросейсмического поля колебаний, но весьма важно будет экспериментально установить, какова когерентность во времени микросейсмического поля, регистрируемого на дневной поверхности.

Полученный алгоритм расчета характеристики фильтров является симбиозом фильтра Винера, свойства когерентности стоячих волн и методов математической статистики. Математическая статистика позволяет не только строить фильтры для выделения когерентных во времени стоячих волн, но и определять точность полученного волнового поля через дисперсию оценки характеристик. Подробное описание алгоритмов оценки точности можно найти в работе [8]. Среднеквадратическая ошибка фазовой характеристики фильтра Винера для пересчета стоячих волн из опорной точки в i -ю будет равна

$$\sigma_\theta(\omega) \approx \frac{\sqrt{1 - \gamma_{0i}^2(\omega)}}{|\gamma_{0i}(\omega)|\sqrt{2n}}.$$

Данная формула позволяет рассчитать ошибку фазовой характеристики в зависимости от частоты в радианах. Относительная ошибка амплитудной характеристики фильтра:

$$\varepsilon[h'_{0i}(\omega)] = \frac{\sigma[h'_{0i}(\omega)]}{|h_{0i}(\omega)|} \approx \frac{[1 - \gamma_{0i}^2(\omega)]^{1/2}}{|\gamma_{0i}(\omega)|\sqrt{2n}}, \quad (12)$$

где $\sigma[h'_{0i}(\omega)]$ — среднеквадратическое отклонение оценки частотной характеристики фильтра. Из этих формул заданная точность и число блоков могут быть увязаны после вычисления значения спектра когерентности на частоте резонанса слоя. Количество блоков определяет длину реализации, записанную в каждой точке обследуемой площадки, и существенно влияет на производительность работ.

Точность восстановления поля стоячих волн будет зависеть от значений когерентности и длительности регистрации. В опытно-методических работах по микросейсмическому районированию методом стоячих волн основной задачей было выяснение возможностей этого метода в микросейсмическом районировании. Сразу

можно сказать, что точность результатов будет зависеть от уровня когерентности стоячих волн в верхней части разреза

4. Сейсмическое микрорайонирование территории г. Осинники (Кемеровская обл.) методом стоячих волн

В соответствии с (12) с увеличением числа блоков для вычислений характеристики фильтра, пересчитывающего колебания из опорной точки обследуемого объекта в i -ю, можно добиться любой заданной погрешности построения фильтра. При малом количестве блоков даже небольшое увеличение их числа обеспечивает существенное уменьшение погрешности. При больших величинах n уменьшение погрешности с увеличением числа блоков замедляется. Высокая точность пересчета колебаний быстро достигается при больших значениях $\gamma(\omega)$. Для случаев с малыми значениями когерентности требуется большое число блоков в одновременной записи.

При регистрации микросейсмических колебаний грунта в г. Осинники была реализована схема наблюдений, приведенная на рис. 1. На каждой точке колебания записывались не менее 24 ч. В опорной точке (рис. 1, ТН1) запись колебаний велась непрерывно в течение всего времени работ.

Важную роль в обосновании точности восстановления поля стоячих волн играет спектр когерентности, который может быть рассчитан по одновременным записям микросейсм в любой паре точек обследуемой территории. Спектр когерентности зависит только от отношения энергии бегущих волн к энергии стоячих. Его значения лежат в диапазоне 0–1. Единица соответствует случаю, когда в двух точках регистрируются только стоячие волны, ноль — только бегущие волны. Таким образом, изучая спектр когерентности, можно выделять собственные (резонансные) частоты исследуемых слоев верхней части разреза.

Не менее важным в методе стоячих волн является вопрос о погрешности как в определении спектров когерентности, так и в расчете фильтров пересчета колебаний. Здания и другие инженерные сооружения характеризуются высокими значениями спектров когерентности (0.8–0.9) на собственных частотах. Поэтому в соответствии с формулами (4), (5) при 5–15-минутной записи колебаний можно достичь погрешности в оценке спектров когерентности и в расчете переходных амплитудных характеристик 5–10 %. Когерентность микросейсмических колебаний грунта на резонансных частотах имеет значительно меньшие значения (в среднем 0.2–0.4), что приводит к необходимости увеличивать время одновременной регистрации колебаний. Для района г. Осинники было установлено, что оптимальное время регистрации микросейсмических колебаний в каждой паре «опорная точка – i -я точка» составляет 10–

15 ч. Это позволяет при низких значениях когерентности колебаний достигать погрешности в расчетах амплитудных характеристик 5–10 %. На рис. 2 представлены спектры когерентности между точками ТН1 и ТН12 и относительные ошибки при их расчете для различной длительности записи микросейсмических колебаний. Можно видеть, что спектр когерентности с увеличением времени регистрации стабилизирует свою форму. При длительности регистрации 10 мин (рис. 2, а) спектр когерентности содержит в своей форме пики, соответствующие наиболее интенсивным стоячим волнам. Однако в целом значения спектра когерентности значительно отличаются по форме от спектров когерентности, рассчитанных по записям большей длительности. Совершенно ясно, что при длительности записи 10 мин нет возможности корректно разделять промышленные шумы и стоячие волны, кроме того, точность измерений стоячих волн будет низкой.

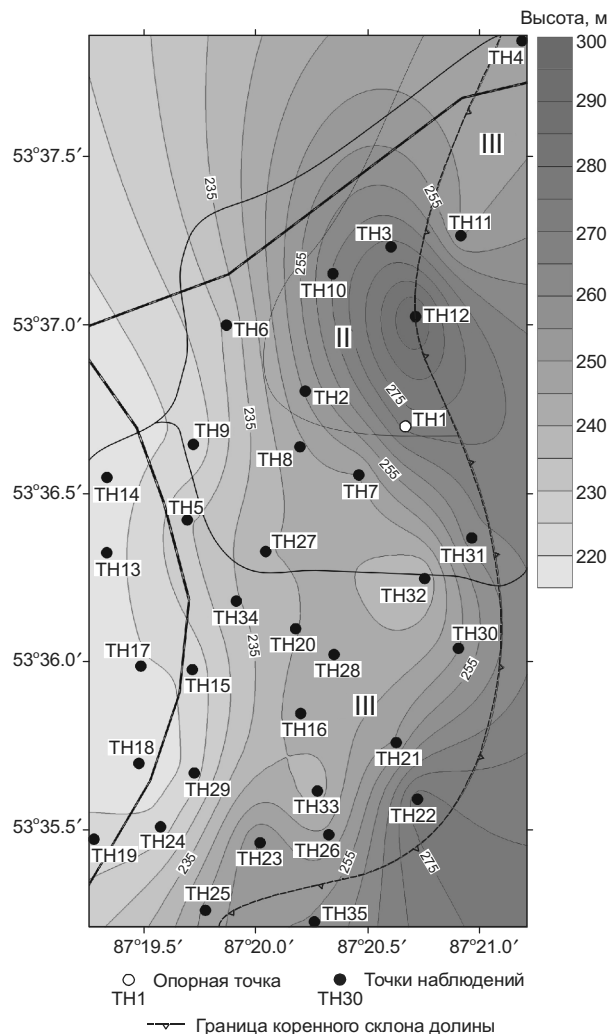


Рис. 1. Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний грунта на территории г. Осинники. II, III — категории грунтов по сейсмическим свойствам

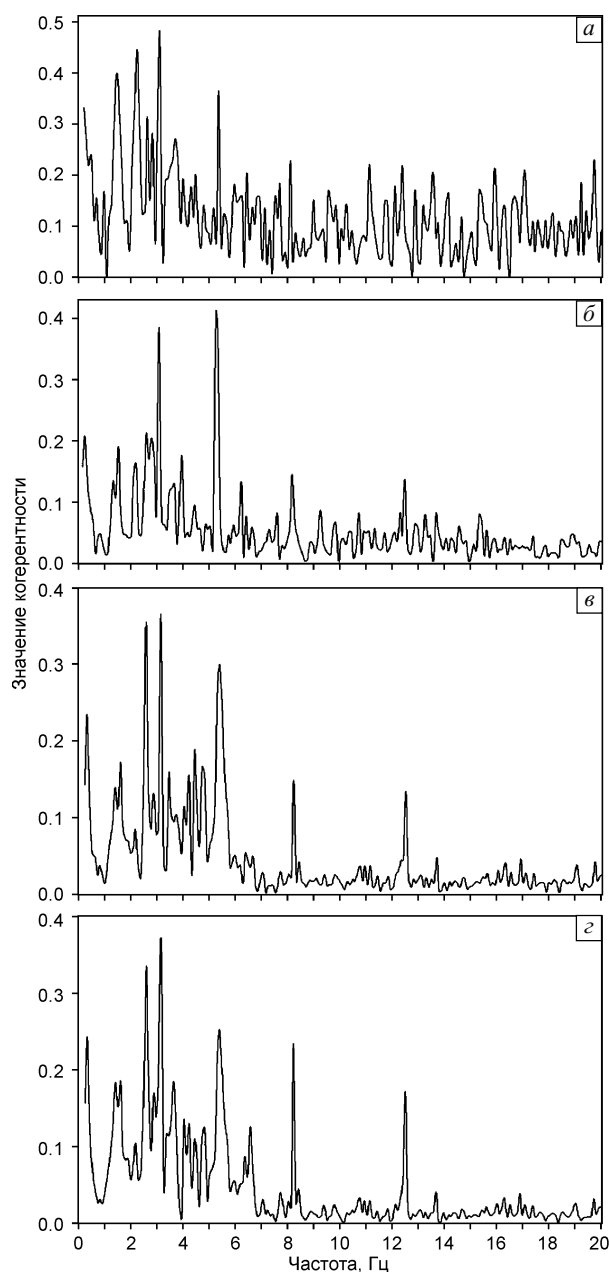


Рис. 2. К обоснованию выбора оптимального времени регистрации: $T = 10$ мин (а), 1 ч (б), 5 ч (в), 10 ч (г). Ошибка в оценке спектра когерентности — при когерентности 0.2: >50 (а), ~35 (б), ~16 (в), ~10 % (г); при когерентности 0.4: ~22 (а), ~15 (б), ~7 (в), ~5 % (г)

Длительность регистрации в 1 ч (рис. 2, б) дает результат, который ближе к истине по некоторым более интенсивным стоячим волнам, но в целом форма спектра когерентности не стабилизировалась. При такой длительности регистрации существует вероятность ошибки в выделении стоячих волн на фоне шумов. Время регистрации 5 ч (рис. 2, в) обеспечивает результат, близкий к значению спектра когерентности для 10 ч регистрации (рис. 2, г). Дальнейшее увеличение времени регистра-

ции для расчета спектра когерентности не приводит к качественным изменениям его формы. Фактически происходит уточнение амплитуд. На рис. 2 даны ошибки определения значений амплитуд стоячих волн при фиксированных значениях когерентности. При времени регистрации микросейсм 10 ч мы можем изучать характеристики стоячих волн с точностью 5–10 %. Если такая точность недостаточна, то необходимо увеличить время регистрации. Исследование спектров когерентности для площадки между опорной и рядовыми точками позволило установить, что для обеспечения точности 5–10 % для стоячих волн требуется 10–15 ч регистрации микросейсм. Эксперимент был проведен с длительностью регистрации ~24 ч.

Обратившись вновь к рис. 2, отметим, что для достаточно большого количества дискретных частот мы имеем когерентные во времени колебания. Совершенно понятно, что в слоистой среде должны формироваться стоячие волны, являющиеся по сути своей резонансами слоев. Резонансные экстремумы достаточно узкие. Их ширина — десятые доли Гц.

Обычно в микросейсмическом методе используют малые длительности записи микросейсмических колебаний. В этом случае спектры сглаживаются и мы имеем максимумы, охватывающие по ширине несколько Гц, т.е. разрешенность по частоте на порядок ниже, чем это требуется для изучения резонансных свойств верхней части разреза. Если бы мы сгладили по частоте спектр когерентности, рассчитанный по 10-минутным записям микросейсм (рис. 2, а), то на частотах от 1 до 5 Гц мы имели бы максимум с повышенной когерентностью. Легко понять, что влияние разного рода промышленных шумов на этот максимум велико и он объединит целую серию стоячих волн с шумами. Кроме того, когерентные колебания на более высоких частотах не войдут в этот максимум. Они будут потеряны после осреднения.

При временах регистрации микросейсм более 10 ч мы получаем возможность уверенно выделить серию когерентных во времени волн, формирующихся в верхней части разреза и дающих объективную информацию о ее резонансных свойствах. Существование набора частот в диапазоне от первых Гц до 15 Гц указывает на достаточно высокую глубинность исследований резонансных свойств разреза. Отмеченный факт существования когерентных во времени сигналов в микросейсмических колебаниях дает возможность изучить резонансные свойства разреза с контролируемой точностью.

Исследование спектров когерентности выполнено для каждой пары компонент: «север – юг», «восток – запад» и по вертикальной компоненте Z. Было установлено, что когерентные во времени колебания зафиксированы для горизонтальных пар одноименных компонент, для вертикальных колебаний когерентность во времени по записям микросейсм не выявлена. Отмеченный факт говорит о том, что стоячие волны на горизонталь-

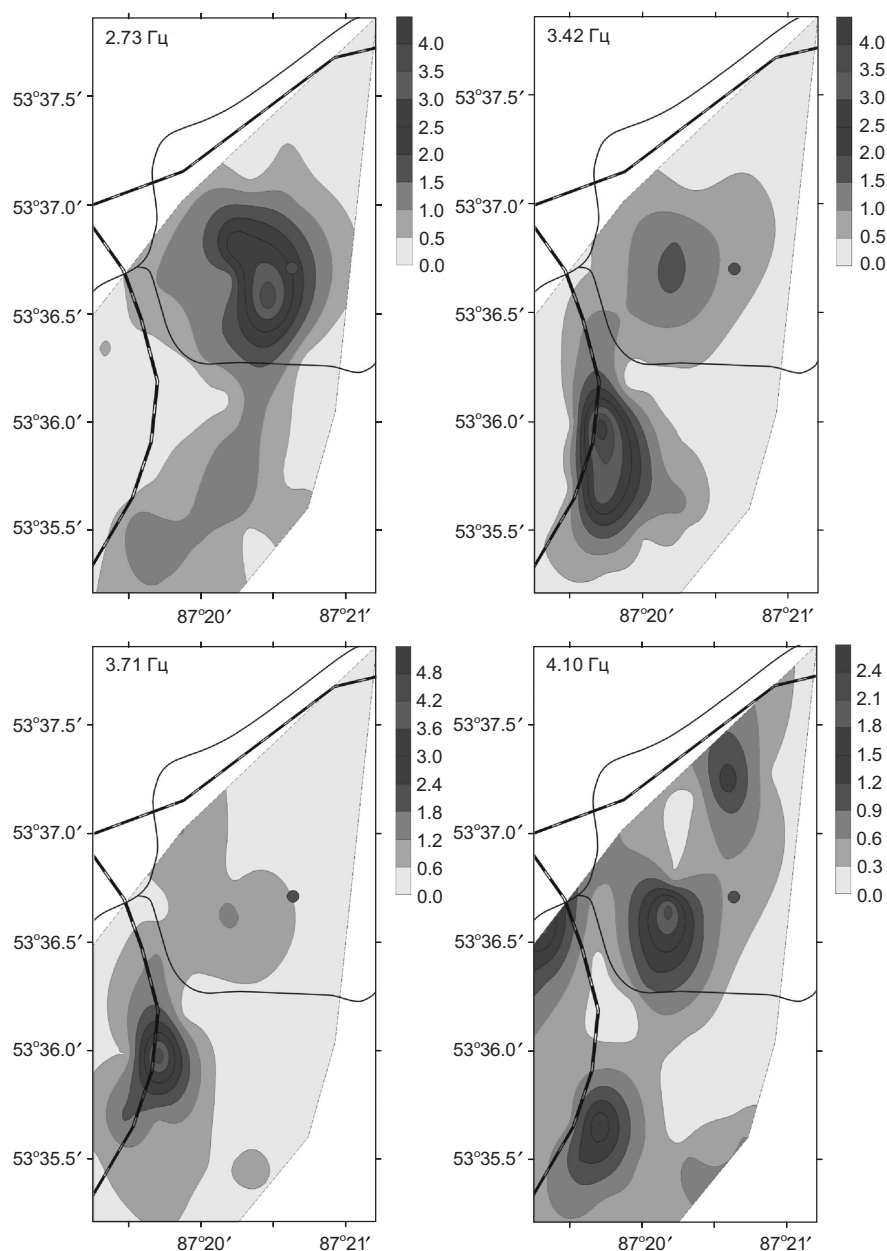


Рис. 3. Карты коэффициентов усиления микросейсмических колебаний грунта на территории г. Осинники в направлении север–юг

ных компонентах в процентном отношении к энергии волнового поля более значимы, чем на вертикальных. Резонансное усиление колебаний от землетрясений будет сильнее выражено на горизонтальных компонентах. Такое утверждение можно делать, опираясь на факт отсутствия зависимости характеристик стоячих волн от источника колебаний.

Обработка данных сейсмического микрорайонирования выполнялась следующим образом.

– Строились спектры когерентности между опорной и рядовыми точками. По спектрам когерентности выделялись собственные частоты слоев верхней части разреза как когерентные во времени колебания.

– Для выделенных собственных частот строились карты значений когерентности для площади исследования.

– Рассчитывались фильтры пересчета колебаний из опорной в каждую рядовую точку системы наблюдений.

– Для каждой из собственных частот строились карты усиления колебаний относительно опорной точки.

– Для каждой из собственных частот строились карты точности определения коэффициентов усиления.

– Для каждой из резонансных частот построены карты приращения бальности.

В итоге мы получили не одну карту приращения бальности, которая не зависит от частоты, а целый набор

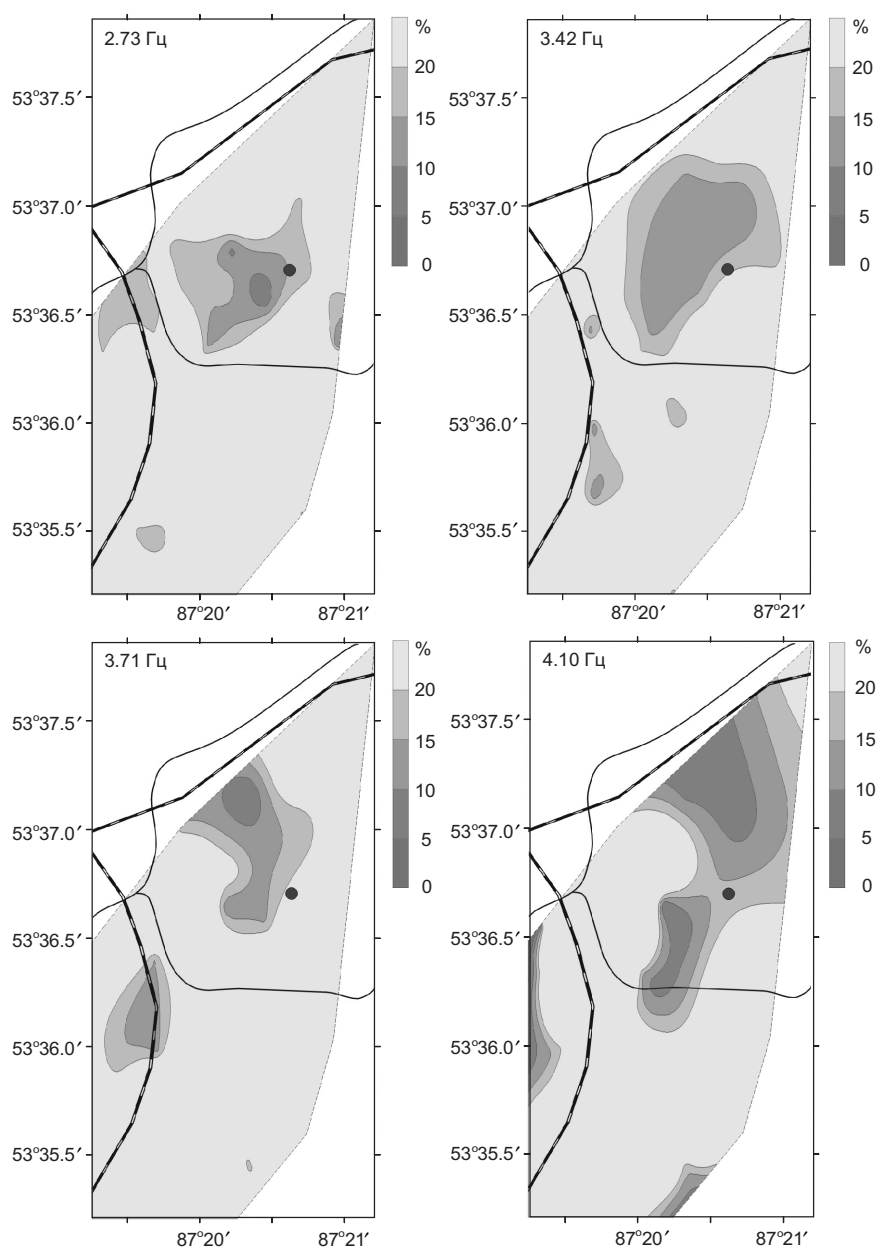


Рис. 4. Карты погрешности пересчета амплитудных характеристик грунта на территории г. Осинники в направлении север–юг

карт для серии собственных частот. Такой результат не предусмотрен нормами строительства в сейсмических районах [10]. Однако несоответствие методики сейсмического микрорайонирования реальным физическим процессам в верхней части разреза в настоящее время уже обоснованно вызывает возражения специалистов [17].

Проведенными экспериментами доказано, что с использованием метода стоячих волн определяются собственные частоты для верхней части разреза и с контролируемой точностью строятся карты усиления колебаний. Набор карт на разных частотах позволяет исполь-

зовать их для оценки сейсмостойкости зданий разной этажности. Дело в том, что собственные частоты зданий существенно изменяются с высотой и особо опасно совпадение резонансов среды и здания. Полученные карты позволяют оценивать сейсмостойкость зданий с учетом частотной характеристики среды. На рис. 3 представлены карты для некоторых собственных частот верхней части разреза. Для данной площадки построены карты на частотах: 1.56, 1.86, 2.25, 2.54, 2.73, 3.42, 3.71, 4.10, 4.88, 5.18, 5.37, 5.76 Гц. Разработанный метод позволяет в дополнение к картам усиления колебаний построить карты точности определения коэффициентов

усиления колебаний. На рис. 4 представлены такие карты для некоторых собственных частот. При длительности регистрации в каждой точке сутки мы достигаем точности изучения резонансных свойств разреза 5–20 %.

5. Выводы

Метод стоячих волн позволяет осуществлять прямое измерение резонансных характеристик верхней части разреза с контролируемой точностью.

Преимуществом метода является то, что источником колебаний грунтов являются микросейсмы, которые всегда присутствуют в земной поверхности. Кроме того, измерения с опорной точкой позволяют с использованием малоканальной аппаратуры за несколько дней регистрации охватывать измерениями большие площади и восстанавливать одновременное поле стоячих волн для всей исследуемой территории.

Для грунтов на территории г. Осинники (Кемеровская обл.) были выявлены резонансные частоты, для которых были построены карты усиления сейсмических колебаний и карты приращений сейсмической интенсивности, опираясь на которые можно прогнозировать реальный уровень колебаний при землетрясениях.

Верхняя часть разреза имеет слоистую структуру, что выражается в наличии набора собственных частот колебаний. Кроме того, колебания на разных частотах несут в себе информацию с разных глубин и позволяют обнаруживать стоячие волны, формирующиеся в горизонтальном измерении между бортами впадин и границами блоков.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН (Программа 16, проект № 3), Президиума СО РАН (Интеграционный проект № 6-18) и гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ № НШ-2750.2006.5.

Литература

1. Меведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. – 284 с.
2. Сейсмическое микрорайонирование. – М.: Наука, 1984. – 236 с.
3. Field E.H., Jacob K.H., Hough S.E. Earthquake site response estimation: A weak-motion case study // Bull. Seism. Soc. Am. – 1992. – V. 82. – No. 6. – P. 2283–2307.
4. Уломов В.И. Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – № 4. – С. 60–68.
5. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Антикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М.: Наука, 1993. – С. 5–94.
6. Еманов А.Ф., Селезнев В.С. Пересчет колебаний фильтрами Винера как основа универсального метода обработки сейсмических волн // Проблемы сейсмологии III тысячелетия: Материалы Межд. геофиз. конф., Новосибирск, 15–19 сентября 2003 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 207–231.
7. Еманов А.Ф. О применении вибраторов для определения сейсмостойкости зданий и в микросейсморайонировании // Геология и геофизика. – 1995. – № 7. – С. 87–92.
8. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. и др. Пересчет стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. – 2002. – № 2. – С. 192–207.
9. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К. Микросейсмические наблюдения. – Архангельск: Институт экологических проблем Севера УрО РАН, 2004. – 64 с.
10. СНиП II-7-81*. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 44 с. + прил. 2:10 карт.
11. Пейн Г. Физика колебаний и волн. – М.: Мир, 1979. – 387 с.
12. Потапов В.А. Инженерно-сейсмологический анализ объемных и поверхностных волн. – Новосибирск: Наука, 1992. – 133 с.
13. Malte I., Wohlenberg J. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments // Bull. Seism. Soc. Am. – 1999. – V. 89. – No. 1. – P. 250–259.
14. Крауфорд Ф. Волны / Берклиевский курс физики. Т. 3. – М.: Наука, 1976. – 526 с.
15. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Излучение. Волны. Кванты / Фейнмановские лекции по физике. Т. 3. – М.: Мир, 1976. – 496 с.
16. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1971. – 408 с.
17. Гусев А.А. О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России // Физика Земли. – 2002. – № 12. – С. 56–70.

Поступила в редакцию
18.12.2007 г.