

**А.М. Запольский**

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦАХ СРЕД**

Приведены результаты исследований поведения сейсмоакустических резонаторов под воздействием различного рода процессов на границе раздела трех природных сред – океана, атмосферы и суши. Выявлены устойчивые группы частот в спектрах колебаний огибающих этих резонаторов. Обсуждается возможная связь между динамикой регистрируемых смещений и поведением огибающих. Представлены также некоторые другие результаты по регистрации сигналов в смежных средах.

### **Введение**

Прибрежная зона Японского моря обладает целым рядом особенностей относительно протекающих в ней геофизических и сейсмоакустических процессов. Здесь пролегает граница трех природных сред: океана, атмосферы и суши. Кроме того, в переходной зоне океан – материк земная кора имеет нерегулярную слоисто-блоковую структуру [1]. Представленные в работе данные получены с помощью лазерного измерителя деформации (ЛИД), или деформографа, отличающегося большой чувствительностью и широкополосностью [2]. Эти особенности прибора, а также упомянутые свойства исследуемой среды обусловили уникальную возможность для изучения разнообразных сейсмо-акустических и геофизических процессов. Помимо этого, в непосредственной близости от ЛИД расположено несколько подземных бетонных сооружений, а также, по-видимому, небольших геоблоков, выполняющих в данном случае роль резонаторов. Они возбуждаются проходящими сейсмоакустическими волнами, в том числе и трансформированными от процессов, протекающих в пограничных средах, и переизлучают энергию на собственных частотах. Все перечисленные факторы накладывают специфический отпечаток на наблюдаемые явления. Большое количество разнообразных сигналов, зарегистрированных с помощью ЛИД, собрано в виде альманаха в работе [3]. Не все из них получили адекватное объяснение. Развитию этой темы посвящена данная статья. Основное внимание уделено анализу динамики сейсмоакустических осцилляторов, изучение которой может пролить свет на некоторые общие и региональные процессы, происходящие в смежных средах. Затронуты также другие вопросы, находящиеся в русле обсуждаемых проблем.

### **О динамике сейсмоакустических резонаторов**

В течение ряда лет при работе на деформографе было отмечено, что в широком спектре сейсмоакустических колебаний, в верхней его части (условно больше 1 Гц), присутствуют весьма стабильные частотные составляющие. Они были выделены с помощью спектрального анализатора СК4-72, подключаемого непосредственно к блоку регистрации (БР) ЛИД. Их частоты немного варьируют в течение сезона и от измерения к измерению, но все же находятся в достаточно узком пределе. В частности, это следующий набор частот: 7,1–7,3; 8,0–8,3; 13,8–14,0; 21,5; 43,5 Гц. Амплитуда этих составляющих постоянно меняется, что видно на экране спектрального анализатора в режиме отслеживания текущих спектров.

В связи с этим возникла мысль проследить за динамикой огибающих амплитуд, чтобы посмотреть, нет ли в их поведении какой-либо связи с окружающим сейсмоакустическим фоном и других закономерностей. Настроив анализатор на заданную частоту и подключая регистрирующий прибор к соответствующему выходу, можно записывать изменение огибающей амплитуды этой частотной составляющей. К сожалению, одновременно можно следить только за одной частотой. Параллельно записи огибающей регистрировался сигнал непосредственно с БР деформографа, а также фиксировался общий метеорологический фон: ветер, вол-

нение, осадки и т. д. Записанные последовательности дискретизировались с интервалом  $\Delta t = 1$  с и подвергались цифровой обработке на ЭВМ. Количество отсчетов в различных реализациях колеблется от 700 до 1000, т. е. записи были непродолжительными по времени. За столь короткий промежуток сейсмоакустический фон не успевает существенно измениться, поэтому можно считать, что фиксируемые процессы были более или менее стационарными. Временные последовательности подвергались спектральной обработке методом быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Для повышения статистической достоверности применялась спектральная оценка Бартлетта, называемая иначе усреднением по отрезкам реализаций [4]. Использовались 6–8 усреднений по частично перекрывающимся временным отрезкам. Перед этим данные взвешивались косинусной колоколообразной функцией, чем достигалось подавление боковых лепестков максимумов на 30 дБ, после чего отрезки дополнялись нулями до  $N = 1024$ . Конечно, существуют более мощные окна, например, Кайзера–Бесселя или Блэкмана–Хэрриса с уровнем подавления лепестков от 70 до 90 дБ, но достигается это ценой потери 30–40% отсчетов на преобразуемом временном отрезке и значительным уширением головного лепестка, что приводит к <размыванию> спектральной плотности максимума и, как результат, искажению ее уровня.

На протяжении длительных наблюдений удалось установить следующее. Наиболее подвержены влиянию местных возбуждений источниками шумового и импульсного характера резонаторы с частотами 8,0–8,3 и 13,8–14,0 Гц. Эти источники легко идентифицировались. Например, полет и посадка вертолета в районе деформографа, артиллерийские стрельбы во время флотских учений в близлежащей акватории (расстояние около 50 км), специально организованные взрывы на расстоянии от 100 до 1000 м. Кроме того, эти резонаторы-осцилляторы легко откликались на возбуждение путем ударов по несущим конструкциям бетонных сооружений и т. п. На рис. 1–3 представлены отдельные примеры таких возбуждений. Запись производилась на однокоординатный самописец Н-338 непосредственно с БР ЛИД. Масштаб по горизонтали соответствует скорости протяжки ленты  $V$ . На этих рисунках  $V = 1$  мм/с. По вертикали две большие клетки соответствуют половине длины волны  $\lambda$  применяемого в интерферометре ЛИД He–Ne-лазера ( $\lambda = 0,63$  мкм).

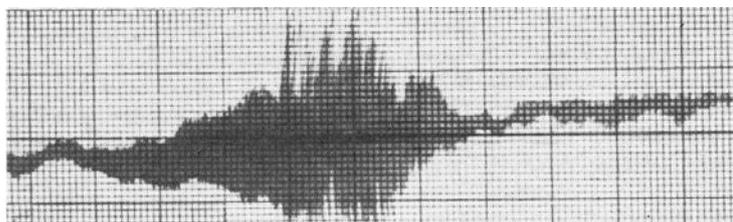


Рис. 1. Шумовое возбуждение резонаторов пролетающим вертолетом

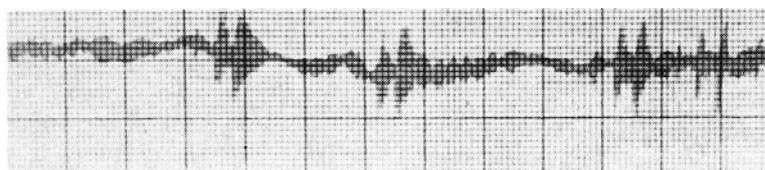


Рис. 2. Двойное импульсное возбуждение резонаторов отдаленным источником

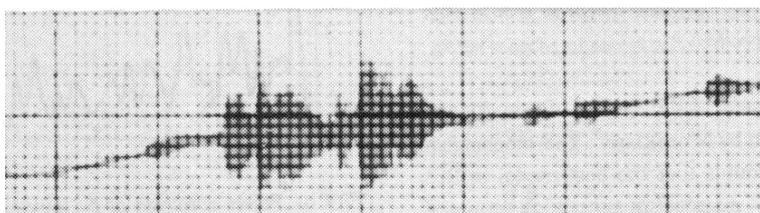


Рис. 3. Возбуждение резонаторов при ударах по их несущим конструкциям

Особенно характерен рис. 2, на котором запечатлены несколько пар импульсных возбуждений. Они зафиксированы во время артиллерийских стрельб с кораблей. Первый выброс в паре – выстрел, второй – взрыв. Интересный пример возбуждения указанных осцилляторов приведен на рис. 4. Он был сделан после тайфуна ночью 22.08.88 г., когда ветер практически затих, но волнение у крутых скалистых берегов со стороны открытого моря было еще очень сильным. Здесь масштаб по горизонтали соответствует  $V=2,5$  мм/с. Совершенно отчетливо видна модуляция волнами высокочастотных колебаний резонаторов с частотами преимущественно 8,0 и 13,8 Гц, что было установлено во время приведенной записи анализатором спектра. Была параллельно приведена запись огибающей 13,8 Гц, подвергнутая затем спектральному анализу.

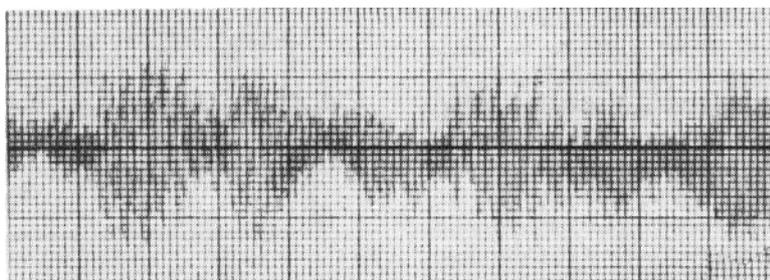


Рис. 4. Модуляция ВЧ колебаний осцилляторов морским волнением после тайфуна

Рис. 5 иллюстрирует спектр мощности колебаний этой огибающей. Выделено несколько дискретных максимумов, сконцентрированных в основном в двух группах с периодами соответственно 19–23 и 6,5–8,5 с, причем главный пик второй группы превышает таковой из первой по мощности.

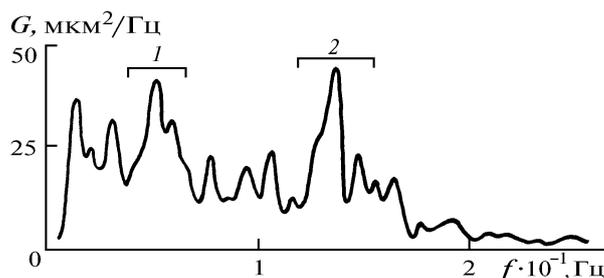


Рис. 5. Спектр мощности огибающей колебаний 13,8 Гц после тайфуна. Горизонтальными скобками 1 и 2 обозначены группы пиков с периодами соответственно 19–23 и 6,5–8,5 с

Такая картина характерна для спектров первичных и вторичных микросейсм, приведенных, в частности, в монографии Ф.И. Монахова [5]. А очевидность механизма их образования не оставляет сомнений в том, что наилучшей моделью, подходящей к данному случаю, является одна из первых моделей генерации микросейсм Вихерта (1903 г.). Для сравнения на рис. 6, а, б приведены спектры огибающей 14,0 Гц этого же осциллятора, сделанные по записям, произведенным за 36 часов до этого с разницей в два часа между собой, когда погода была достаточно спокойной.

Обращают на себя внимание два момента. Во-первых, на двух последних спектрах заметно значительное уменьшение амплитуды колебаний в более высокочастотной части спектра при  $T < 30$  с (см. изменение масштаба по вертикали) при резком спаде мощности во второй группе пиков, во-вторых, наблюдается дробление спектральной энергии на большее число максимумов и проявление промежуточной группы пиков с периодами 9,5–13,5 с (на рис. 5 она завуалирована более мощными соседними группами). В целом же структура приведенных спектров имеет сходный характер. Рис. 7 демонстрирует спектр резонатора с частотой 8,0 Гц, построенного по записи от 20.08.88 г., выполненной через полтора часа после записи огибающей сигнала с частотой 14 Гц, спектр которой приведен на рис. 6. Метеорологическая и сейсмо-акустическая обстановка за это время практически не изменилась. Структура этого спектра подобна приведенным выше, что свидетельствует о сходных механизмах возбуждения данных резонаторов. Можно отметить три группы периодов: 26–35; 11–15; 7–9 с.

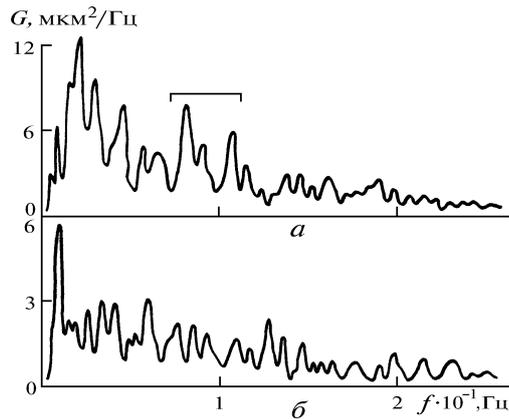


Рис. 6. Спектр мощности огибающей колебаний 13,8 Гц в спокойную погоду; скобкой отмечена группа периодов 9,5–13,5 с

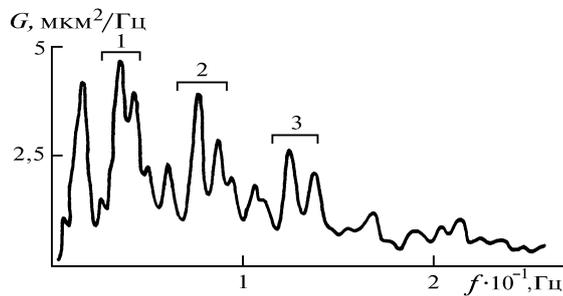


Рис. 7. Спектр огибающей 8,0 Гц. Скобками 1,2,3 отмечены группы пиков с периодами соответственно 26–35, 11–15, 7–9 с

На рис. 8, *a, б* показаны спектры огибающих амплитуд резонаторов с частотами 21,5 и 43,5 Гц. Записи колебаний выполнены значительно позже – соответственно 22 и 23 сентября 1988 г. Тем не менее строение этих спектров подобно уже рассмотренным. Конечно, не все максимумы в этих спектрах можно отнести к возбуждению осцилляторов нагрузкой прибора на отвесные берега в районе установки ЛИД. Некоторые пики, в особенности в низкочастотной части спектра ( $T > 30$  с), не поддаются столь простой интерпретации. Сравнение спектров огибающих со спектрами, построенными по записям непосредственно с БР ЛИД, не указывает на их прямую связь.

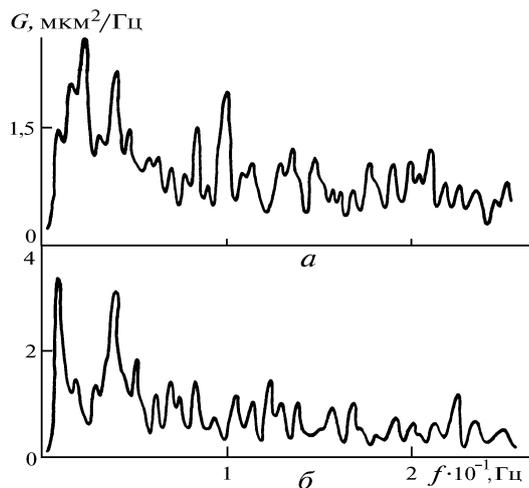


Рис. 8. Спектры огибающих: *a* – 21,5; *б* – 43,5 Гц

Можно предположить, что резонаторы весьма чувствительны к шумовым процессам, происходящим в верхней части земной коры, и непосредственно не связанным со смещением, регистрируемым деформографом.

Перейдем теперь к рассмотрению поведения резонатора с собственной частотой 7,1–7,3 Гц. На рис. 9 (*а, б, в*) показаны спектры трех записей колебаний ее огибающей. Характер этих спектров существенно отличается от рассмотренных выше и имеет спадающий характер с увеличением частоты при отсутствии резких всплесков в средней части. В таком виде они больше соответствуют спектру смещений, один из примеров которых приведен на рис. 10. Спектр построен по записи непосредственно с БР ЛИД одновременно с записью огибающей сигнала с частотой 7,3 Гц от 21.09.88 г. Строение этих спектров более сходно между собой, чем в случае осцилляторов с частотами 8,0–8,3; 13,8–14,0 и 21,5 Гц. Видимо, это связано с тем, что резонатор с собственной частотой 7,1–7,3 Гц не находится непосредственно вблизи деформографа и, наверное, не связан с подземными бетонными сооружениями. Скорее всего, это минигеоблок, расположенный на значительном удалении от ЛИД. Такой вывод можно сделать из того факта, что данный резонатор практически не откликается на местное возбуждение различного характера, примеры которого рассмотрены на рис. 1–3. Его возбуждение связано, видимо, с глубинными процессами, происходящими в коре, и больше отражает общий сейсмоакустический фон. С целью выяснения возможностей такой связи была рассчитана функция коэффициентов корреляции между записями смещения и огибающей сигнала с частотой 7,1 Гц от 13.10.88 г. Сделано это следующим образом. Из обеих реализаций брались выборки по 300 отсчетов. Они сдвигались по всей длине реализации с шагом 20 с. По всем возможным комбинациям этих выборок строились функции коэффициентов корреляции.

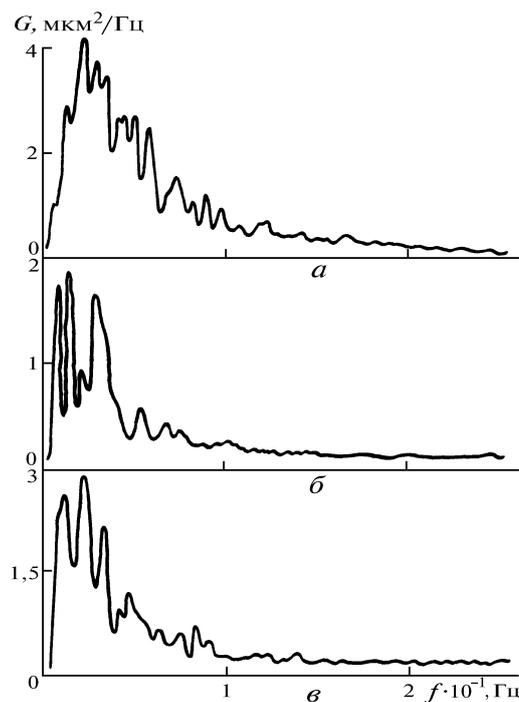


Рис. 9. Спектры трех последовательных записей огибающих резонатора с частотой 7,1–7,3 Гц

На рис. 11 построен один из графиков такой функции при нулевом сдвиге от начала измерения смещений. Сдвиг от начала измерения огибающей частоты отложен по оси абсцисс. Обращает на себя внимание довольно необычное поведение этой функции. Ее максимумы расположены при довольно большом сдвиге  $\tau = 220$  и  $\tau = 440$  с. Трудно предположить, что взаимодействие происходит с таким запаздыванием. Значения максимумов ( $0,4 < r < 0,5$ ) невелики, но для данного размера выборок являются статистически значимыми [6].

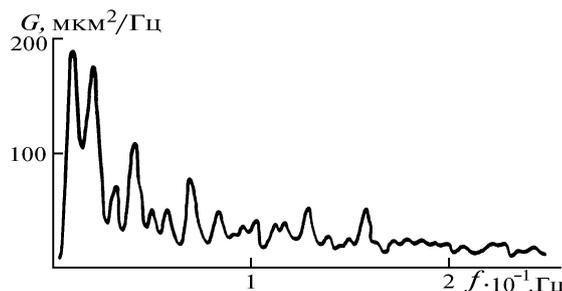


Рис. 10. Спектр смещений по записи, одновременной с регистрацией огибающей, представленной на рис. 9,а

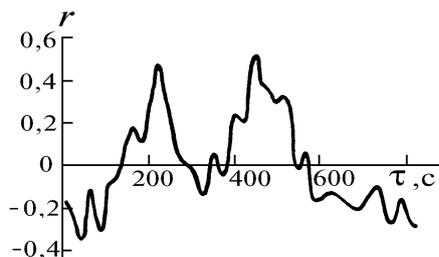


Рис. 11. Функция коэффициентов корреляции между реализациями смещения и огибающей резонатора 7,1 Гц при нулевом сдвиге от начала измерения смещений;  $\tau$  - сдвиг от начала реализации огибающей

Характер поведения  $r$  попытаемся объяснить следующим образом. В обеих реализациях, судя по спектрам, присутствуют мощные низкочастотные составляющие ( $T > 100$  с), которые обуславливают, в основном, <макроповедение> как смещения, так и огибающей. Функция  $r(\tau)$  отражает, с одной стороны, фазовые соотношения между ними, а с другой – различие этих частот, что подтверждают и просматривающиеся биения функции  $r(\tau)$ . Мелкие колебания свидетельствуют о наличии менее мощных высокочастотных гармоник в рассматриваемых последовательностях. Таким образом, анализируя взаимную корреляционную функцию двух процессов, можно высказать предварительные суждения о спектральном составе рассматриваемых временных зависимостей.

### Несколько замечаний о регистрации других сигналов

Наряду с изучением поведения осцилляторов, находящихся в районе ЛИД, осенью 1988 г. были проведены эксперименты по изучению взаимодействия морских внутренних волн (ВВ) с деформациями верхнего слоя земной коры. Изучение динамики спектральных составляющих парных реализаций колебания термоклина и смещений грунта дает основание полагать, что существуют определенные частоты, а также пространственные области на шельфе, где связь между указанными процессами наиболее существенна [7]. Следует отметить еще одно обстоятельство. Средние спектры, рассчитанные по всей длине реализаций в рассмотренных парах, содержат пики, некоторые из которых можно отождествить с собственными колебаниями Земли (СКЗ) [8]. Они могут быть отнесены к следующим сфероидальным и крутильным тонам и обертонам:  ${}_0S_2$  ( $T = 53,2$  мин),  ${}_0T_2$  ( $T = 44,5$  мин),  ${}_0T_3$  ( $T = 28,8$  мин),  ${}_0S_4$  ( $T = 25,8$  мин),  ${}_2S_2$  ( $T = 15,3$  мин) и некоторым другим. Наличие подобных гармоник в колебаниях термоклина весьма неожиданно и свидетельствует о том, что связь между указанными процессами носит взаимный характер. Хотя, вообще говоря, теоретическое рассмотрение СКЗ учитывало, в основном, твердое строение Земли. Принимая во внимание, что ее поверхность на 2/3 покрыта водой, колебания Земли не могут не отразиться на колебаниях водного слоя.

И наконец, несколько слов еще об одном сигнале. Автором настоящей работы 18 октября 1988 г. в 13 ч 43 мин по местному времени был зарегистрирован на деформографе сигнал от подземного ядерного взрыва, произведенного, как потом было сообщено в телевизионной программе <Время>, в 6 ч 20 мин по московскому времени в районе Семипалатинска. Учитывая разницу в 7 часовых поясов, легко подсчитать, что сигнал преодолел расстояние  $\sim 4025$  км по прямой за 23 минуты. Таким образом, судя по скорости  $\sim 2,9$  км/с, можно предположить,

что ЛИД достигла, в основном, поверхностная волна типа рэлеевской. Хотя, учитывая продолжительность зафиксированного сигнала ~ 1 мин, имела место значительная дисперсия при распространении ударной волны. К сожалению, запись этого сигнала у автора не сохранилась, но она похожа на шумовой сигнал, представленный на рис. 12.

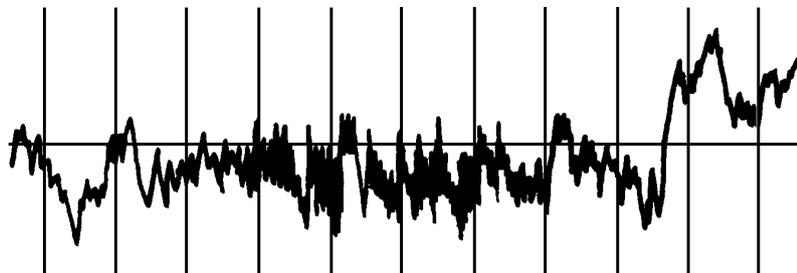


Рис. 12

1. Липкин Ю.С., Холодкевич Е.Д. // Переходные явления в океане, атмосфере и литосфере. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. С.72–81.
2. Долгих Г.И. Исследование сейсмоакустических процессов в переходной зоне океан–материк лазерным деформографом равноплечевого типа. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Владивосток, ТОИ ДВО АН СССР, 1988. 112 с.
3. Запольский А.М., Копвиллем У.Х. Нелинейные эффекты в земной коре/ АН СССР. Дальневост. отд-ние Тихоокеанск. океанолог. ин-т. Владивосток, 1989. 39 с. Деп. в ВИНТИ 04.12.89, N 6713–В89.
4. Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. М.: Недра, 1985. 400 с.
5. Монахов Ф.И. Низкочастотный сейсмический шум Земли М.: Наука, 1977. 95 с.
6. Бендат Д., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
7. Запольский А.М., Копвиллем У.Х. Взаимодействие внутренних волн и сейсмоакустических колебаний земной коры. // Колебания и волны на Солнце. Иркутск, 1991. С 12–15.
8. Собственные колебания Земли. / Под ред. В.Н. Жаркова. М.: Мир, 1964. 316 с.

Тихоокеанский океанологический институт  
Дальневосточного отделения РАН

Поступила в редакцию  
18 марта 1993 г.

#### A.M. Zapolskii. Some Aspects of the Seismo-Acoustic Processes at the Media Interfaces.

Some results of investigations of the seismo-acoustic resonators behavior under the action of different processes occurring at the interface of ocean, the atmosphere and land are discussed. Certain stable groups of frequencies in the spectrum of vibrations of these resonators envelopes are revealed. Possible relations of these envelopes behavior to the dynamics of recorded displacements are discussed. Some other results on recording signals in neighboring media are also presented in this paper.