



## МОДЕЛЬ МОДУЛЯЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ ПРИЛИВНЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

Зайцев В.Ю.<sup>1</sup>, Салтыков В.А.<sup>2</sup>, Матвеев Л.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, [salt@emsd.ru](mailto:salt@emsd.ru)

### Введение

В 2007 году исполнилось 20 лет с начала изучения на Камчатке высокочастотных сейсмических шумов (ВСШ). За это время был получен ряд результатов, имеющих как фундаментальный, так и прикладной характер [7]. В первую очередь следует упомянуть подтверждение эффекта модуляции сейсмических шумов земными приливами и обнаружение вариаций параметров приливной компоненты огибающей ВСШ перед сильными региональными землетрясениями. Для дальнейшего использования этого эффекта необходимо понимание механизма этих эффектов, то есть физическая интерпретация. Непонятными, в частности, являются:

- механизм влияния формирующегося очага землетрясения на ограниченный объем среды в окрестностях станции;
- механизм приливной модуляции;
- механизм появления предвестниковых вариаций ВСШ перед землетрясением.

Рассматривая механизм приливной модуляции ВСШ, можно выделить два случая, обусловленных принципиально различными причинами: приливное воздействие на источники ВСШ и приливные вариации свойств среды. В представляемой статье мы будем рассматривать второй случай.

### Модуляция ВСШ приливами

За время, прошедшее с начала исследования ВСШ на Камчатке и первого обнаружения нами приливной модуляции шумов, произошли большие изменения как в технике регистрации, так и в методике обработки. Число станций, регистрирующих ВСШ, увеличено до четырех. Следует отметить, что регистрация ВСШ организована в совершенно различных условиях: «Начики» и «Карымшина» – на Камчатке, «Шикотан» – на Южных Курилах, «Эримо» – на о. Хоккайдо. Подробно геолого-геофизические особенности и условия регистрации ВСШ описаны в [9]. Обнаружение модуляции шумов приливами на всех этих пунктах является весомым доказательством реального существования исследуемого эффекта. Однако, при этом упор делался на выявление лишь статистически значимых вариаций огибающей ВСШ с периодами основных приливных волн. В последующих работах [6-8], связанных с выявлением предвестников сильных землетрясений, как правило, рассматривались фазовые параметры. Амплитуде же этих вариаций внимание не уделялось. Частично этот пробел мы восполним в данной публикации.

Как отмечалось в [9] всегда в огибающей сигнала присутствует компонента с периодом 24.00 часа (а также 12.00 час.), обусловленная действием антропогенного и метеорологических факторов. Это налагает большие ограничения на использование приливных волн  $P_1$ ,  $K_1$  и  $S_2$ , которые являются одними из самых мощных приливных волн, но имеют периоды 24.07, 23.93 и 12.00 час. близкие периодам помех. Из тех волн, которые являются достаточно сильными в приливном воздействии, остаются волны  $O_1$  (период  $T=25.82$  час.),  $M_2$  ( $T=12.42$  час.),  $Q_1$  ( $T=26.87$  час.)  $N_2$  ( $T=12.66$  час.) [4]. Для выделения периодических компонент в огибающей ВСШ будет использоваться модифицированный метод Буй-Балло [10] (он же – метод наложения эпох):

$$X(t) = \overline{x(t+nT)} = \sum_{n=0}^N x(t+nT)/(N+1),$$

где  $X(t)$  - периодическая компонента с периодом  $T$ , выделенная из исходного числового ряда  $x(t)$  путем осреднения ( $N+1$ ) отрезков исходного ряда ( $n$  – номер отрезка). Модификация метода заключается в использовании не среднеарифметического значения сигнала, а его медианы:

$$X(t) = \text{mediana}\{x(t+nT)\}, \quad n = \overline{0, N}.$$

Такой подход представляется оправданным при наличии импульсных помех (выбросов).

Следует иметь в виду, что отклик на приливное воздействие не носит стабильный во времени характер [5, 9]: участки существования приливной компоненты сменяются участками ее от-

существия, меняются амплитудно-фазовые соотношения «прилив-ВСШ», в то время как сами земные приливы имеют постоянные во времени параметры (амплитуды, периоды и фазы набора приливных волн). В связи с этим на рис.1 приведены выделенные вариации огибающей ВСШ с приливными периодами для всех четырех станций, для четырех периодов (соответствующих периодам волн  $O_1$ ,  $M_2$ ,  $Q_1$  и  $N_2$ ) и для участков различной длительности.

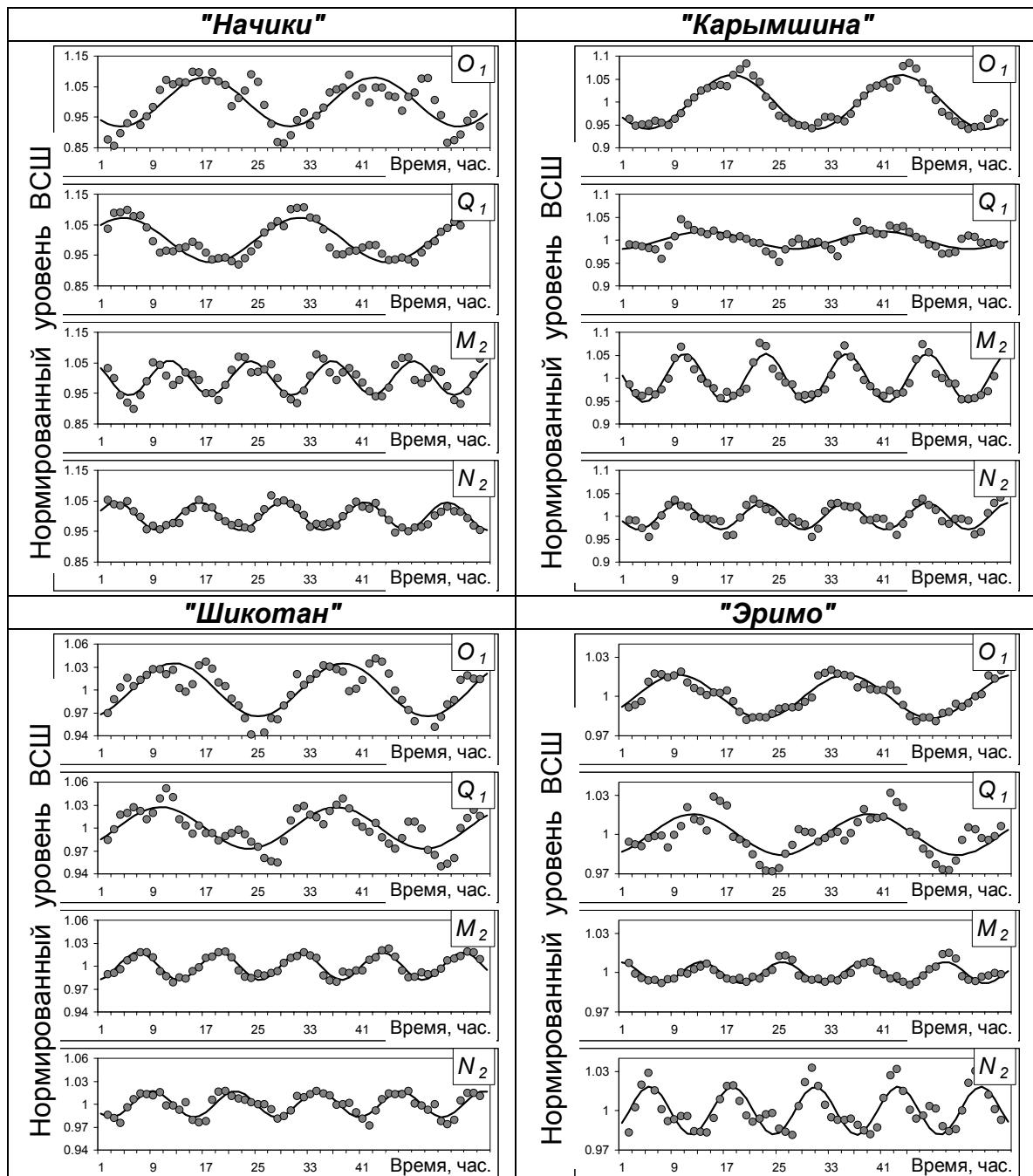


Рис. 1. Вариации уровня ВСШ с периодами, соответствующими приливным гармоникам  $O_1$ ,  $Q_1$ ,  $M_2$  и  $N_2$ , на четырех пунктах регистрации ВСШ – «Начики», «Карымшина», «Шикотан» и «Эримо». Сплошная линия – аппроксимация представленных точек гармоникой с периодом соответствующей приливной волны по методу наименьших квадратов. Длительность анализируемых данных представлена в таблице.

Как отмечалось выше, в данной работе нас интересует амплитуда приливного отклика ВСШ. В относительной шкале ее характеризует глубина модуляции:

$$\frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\max} + X_{\min}} = \frac{A_T}{\bar{X}} ,$$

где  $X_{\max}$  и  $X_{\min}$  – максимальное и минимальное значение периодической компоненты огибающей ВСШ,  $A_T$  – амплитуда аппроксимирующей гармоники,  $\bar{X}$  – среднее значение огибающей ВСШ.

Таблица. Глубина модуляции уровня ВСШ приливными процессами

Тип волны	«Начики»	«Карымшина»	«Шикотан»	«Эримо»
$O_1$	$(8.0 \pm 2.1)\%$	<i>114</i>	$(5.9 \pm 1.0)\%$	<i>639</i>
$Q_1$	$(7.3 \pm 1.6)\%$	<i>300</i>	$(1.9 \pm 1.0)\%$	<i>347</i>
$M_2$	$(5.6 \pm 1.6)\%$	<i>103</i>	$(5.3 \pm 0.8)\%$	<i>502</i>
$N_2$	$(4.6 \pm 1.4)\%$	<i>163</i>	$(2.9 \pm 1.0)\%$	<i>317</i>

Примечание. Курсивом показана продолжительность интервала данных (в сутках) при выделении приливных компонент уровня ВСШ.

Как следует из таблицы, во всех представленных примерах выделения приливной компоненты ВСШ глубина модуляции составляет  $(1..10)\%$ . Учитывая различные геологические условия, в которых получены исходные данные, а также достаточно произвольно выбранный временной интервал для анализа, можно рассматривать полученную глубину модуляции не как аномальную, а как обычную для исследуемого эффекта.

### Проблема интерпретации результатов

Основным препятствием для интерпретации этих данных является, казалось бы, слишком большая величина эффекта  $\sim 10^{-2}..10^{-1}$  по сравнению с воздействующими на состояние горных пород приливными деформациями с характерной амплитудой  $10^{-8}$ . Повышенная упругая нелинейность хотя и описывает наблюдаемые приливные вариации скоростей упругих волн порядка  $\sim 10^{-3}..10^{-5}$  [11, 12], но не может объяснить на 2-3 порядка более сильную модуляцию шумов.

“Неклассическая” гистерезисная нелинейность (в принципе способная приводить к появлению дополнительной диссипации для одной волны под действием другой) также не может объяснить этот эффект. Проблема здесь в том, что при большой разнице частот взаимодействующих возмущений ( $10^6..10^7$  раз в обсуждаемом случае) этот эффект оказывается пренебрежимо мал [14].

Альтернативное предположение о приливном влиянии не столько на условия распространения шумов, сколько на сами их источники также не представляется достаточно оправданным, по крайней мере, в качестве единственного механизма. Действительно, выраженная приливная модуляция шумов наблюдалась [8] в различные фазы сейсмоактивности (и до, и после землетрясений), когда фоновые напряжения горных пород должны были существенно различаться. В связи с этим для интерпретации всей совокупности таких данных требуется найти иной, более универсальный и грубый (в смысле условий самого его существования) механизм.

### Негистерезисные амплитудно-зависимые потери в среде

Для обсуждаемого класса микронеоднородных сред характерно наличие контрастно-мягких (по сравнению с однородной средой-матрицей) особенностей, прежде всего, трещин и контактов [5]. В силу локально повышенной сжимаемости на таких дефектах локализуются наибольшие деформации и, соответственно, отклонения от линейного закона Гука, что обуславливает сильное возрастание средней (макроскопической упругой нелинейности среды) [5, 13]. Те же повышенные деформации (и, соответственно, скорости деформаций) приводят и к сильно локально-повышенным потерям и, следовательно, заметному росту макроскопических диссипативных параметров по сравнению с однородным материалом. Утверждение о важности наличия именно мягких дефектов для возрастания нелинейности среды в настоящее время стало общепринятым [5], причем горные породы приводятся в качестве одного из наиболее ярких примеров сред, обладающих такими микроструктурными особенностями.

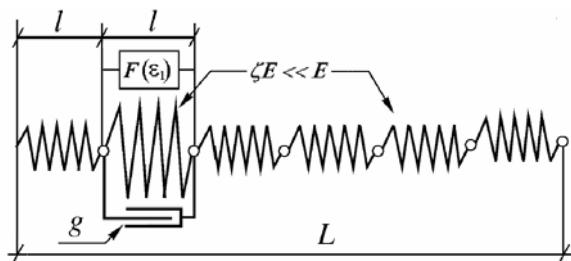


Рис. 2. Реологическая модель микронеоднородной упругой среды с мягкими дефектами. Функция  $F(\cdot)$  и параметр  $g$  описывают их упругую нелинейность и эффективную вязкость. Количество дефектов характеризуется их погонной концентрацией  $v = l/L$  в одномерном случае или относительным объемным содержанием при обобщении на трехмерный случай.

Чтобы наглядно показать сущность механизма негистерезисной амплитудно-зависимой диссипации в таких средах воспользуемся наглядной реологической моделью, учитывающей отмеченные выше основные особенности материала (рис. 2). Отметим, что для выявления микроструктурно-обусловленных амплитудно-зависимых потерь достаточно учесть нелинейный ха-

тер деформирования и наличие потерь только на мягких дефектах (где деформации в силу их мягкости сильно повышены), а среду-матрицу можно считать идеально упругой и линейной, как это и показано на рис. 2. При этом уравнение состояния дефектов можно записать в виде  $\sigma = \zeta E[\varepsilon_1 + F(\varepsilon_1)] + g d\varepsilon_1 / dt$ , где упругое напряжение  $\sigma$  в среде связано с локальной деформацией  $\varepsilon_1$  мягкого дефекта, причем величина  $\varepsilon_1$  значительно больше, чем средняя деформация  $\varepsilon$  материала с силу высокой мягкости дефекта, характеризуемой малым параметром  $\zeta \ll 1$ . При этом упругий модуль  $E$  характеризует однородную упругую среду-матрицу. Для нашего обсуждения эффектов, наблюдающихся при очень малых деформациях, будет вполне достаточно учесть низший, квадратичный по деформации  $\varepsilon_1$  порядок упругой нелинейности дефектов:  $F(\varepsilon_1) = \gamma \varepsilon_1^2$ . Параметр нелинейности  $\gamma$  будем считать отрицательным, так как под действием растягивающего напряжения  $\varepsilon > 0$  обычно материал становится мягче. Подчеркнем, что в масштабе локальной деформации  $\varepsilon_1$  дефекта его нелинейность имеет вполне обычный невысокий уровень, т.е. локальный параметр нелинейности  $\gamma$  имеет величину порядка нескольких единиц, что типично для однородных упругих сред [3].

В работе [1] показано, что отмеченные выше минимальные предположения о характере микроструктуры среды (наличие мягких дефектов типа трещин, на которых локализована нелинейная упругость и обычные линейные релаксационные потери) приводят к выводу о существовании в такой среде выраженной амплитудно-зависимой диссипации. Для большей наглядности результатов также примем пока одинаковое значение параметра мягкости дефектов  $\zeta$ . Выделяя при указанных предположениях реальную и мнимую части осциллирующего напряжения, получим [1] следующие выражения для эффективного упругого модуля  $E_{eff}$  среды и декремента  $\theta$  для осциллирующей компоненты деформации в присутствии квазистатического воздействия  $\varepsilon_0$ :

$$E_{eff} / E \approx 1 - \frac{\nu}{\zeta} \frac{1}{1 + \bar{\omega}^2} - 2 \frac{\nu |\gamma| \varepsilon_0}{\zeta^2} \frac{1 - \bar{\omega}^2}{(1 + \bar{\omega}^2)^2} \quad (1)$$

$$\theta = \theta_{lin} + \theta_{nl} \approx \pi \frac{\nu}{\zeta} \frac{\bar{\omega}}{1 + \bar{\omega}^2} + 2\pi \frac{\nu |\gamma| \varepsilon_0}{\zeta^2} \frac{2\bar{\omega}}{(1 + \bar{\omega}^2)^2}, \quad (2)$$

где введена нормированная частота  $\bar{\omega} = \omega / (\zeta \Omega)$ ,  $\zeta \Omega$  имеет смысл релаксационной частоты дефекта,  $\nu$  - концентрация дефектов, причем в (1), (2) использовано вполне оправданное предположение [1], что вкладом однородной среды-матрицы в поглощение можно пренебречь.

Последнее слагаемое в выражении (2) показывает, что учтенные в модели хорошо известные факторы (мягкость, квадратичная упругая нелинейность и линейные потери на дефектах) в комбинации приводят к выраженной амплитудно-зависимой диссипации, которая должна быть типична для очень широкого класса сред, обладающих указанными особенностями. Как наглядно видно из (1) и (2), линейные и нелинейные вклады дефектов (как реактивный упругий, так и диссипативный) определяются, одними и теми же их параметрами в похожих комбинациях. При этом имеется, однако, следующая существенная разница: дефекты дают одинаковые по порядку величины нелинейные вклады в *относительное* изменение упругого модуля  $E_{eff}$  и в *абсолютное* (а не относительное!) изменение декремента  $\theta$ . Отсюда следует, что амплитудно-зависимые (в нашем случае от  $\varepsilon_0$ ) относительные вариации декремента  $\Delta\theta / \theta \sim \theta_{nl} / \theta_{lin}$  оказываются многократно выше, чем сопутствующие им вариации упругого модуля  $\Delta E / E \gg \Delta\theta / \theta$ , поскольку даже в средах с дефектами (таких, как горные породы) декремент практически всегда много меньше единицы,  $\theta \ll 1$ . Рассмотрим, как такие вариации  $\Delta\theta / \theta$  могут повлиять на уровень шумов, даже предполагая стационарным уровень источников их эмиссии.

### Модельные оценки глубины приливной модуляции ВСШ

Сделаем оценку ожидаемого уровня приливных эффектов для эндогенных шумов на основе следующих простых соображений. Для приемника, помещаемого в начало координат и настроенного на спектральную составляющую на частоте  $\omega$ , излучаемую  $i$ -ым источником, имеющим координату  $r_i$  и амплитуду  $A_i(\omega)$ , соответствующая амплитуда в точке приема имеет вид

$$A_i = [A_0^i f_i(\phi) / r_i] \exp[-\theta(\omega) r_i / \lambda] \quad (3)$$

(где  $\lambda$  -длина упругой волны, соответствующая частоте  $\omega$ ). Выражение (3) учитывает сферическую расходимость и экспоненциальное ослабление сигнала, а функция  $f_i(\phi)$  пространственного угла  $\phi$  описывает возможную угловую направленность источника. Результирующая спектральная интенсивность  $I(\omega)$  шума определяется суммированием вкладов всех окружающих источников.

При выполнении суммирования усреднение по ориентациям дает некоторый множитель, не зависящий от свойств среды, так что дальнейшее суммирование по объему источников может быть представлено в виде интеграла по радиальной координате:

$$I(\omega) \propto \sum_i A_i^2 \propto \int_0^{\infty} \left( \frac{\exp[-\theta(\omega) \frac{r}{\lambda}]}{r} \right)^2 r^2 dr \propto \frac{\lambda}{\theta(\omega)} \quad (4)$$

Из структуры (4) видно, что для заданной интенсивности источников результирующая величина  $I(\omega)$  определяется вкладом области, размер которой ограничен характерной длиной затухания  $\lambda/\theta$ . При этом в среде, у которой внешнее воздействие модулирует ее упруго-диссипативные свойства, относительные вариации интенсивности принимаемого шума определяются, прежде всего, относительными вариациями декремента:

$$\frac{\Delta I(\omega)}{I(\omega)} \propto \Delta \left( \frac{\lambda}{\theta(\omega)} \right) / \left( \frac{\lambda}{\theta(\omega)} \right) = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} - \frac{\Delta \theta}{\theta} \approx -\frac{\Delta \theta}{\theta}, \quad (5)$$

поскольку для микронеоднородных сред  $\Delta \lambda / \lambda \approx \Delta E / (2E) \ll \Delta \theta / \theta$ , как пояснялось выше.

Оценка  $\Delta \theta / \theta$  на основе (2), показывает, что при заданной величине  $\varepsilon_0$  относительные вариации  $\Delta \theta / \theta = \theta_{nl} / \theta_{lin} \sim 2 |\gamma| \varepsilon_0 / \zeta$  определяются фактически только собственной нелинейностью дефектов  $\gamma$  и их эффективной мягкостью  $\zeta$  и не зависят от концентрации  $v$  дефектов. Предположим для оценки умеренное значение параметра собственной нелинейности дефекта  $|\gamma|=5$  и выберем значение параметра мягкости  $\zeta$  в диапазоне  $10^{-5}..10^{-6}$  («выживание» трещин со столь малым дифференциальным значением мягкости  $\zeta$  возможно [2] не только непосредственно у поверхности, но и на умеренных глубинах, при учете волнистой неровности границ реальных трещин). Тогда для амплитуды приливных деформаций  $\varepsilon_0 \sim 10^{-8}$  ожидаемая величина индуцированных вариаций эндогенного шума составляет  $\Delta I(\omega) / I(\omega) \sim 0.01..0.1$ . Эта оценка прекрасно согласуется с характерной глубиной наблюдаемых вариаций.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 06-02-72550 и № 08-05-00692).

#### Список литературы

1. Зайцев В.Ю., Матвеев Л.А. Амплитудно-зависимая диссипация в микронеоднородных средах с линейным поглощением и упругой нелинейностью // Геология и геофизика. 2006. Т.47. №5. С. 695-710.
2. Зайцев В. Ю., Салтыков В.А., Матвеев Л. А., О связи приливной модуляции сейсмических шумов с амплитудно-зависимыми потерями в горных породах // Акуст. журн. 2008 (принято к печати)
3. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Нелинейные явления при распространении упругих волн в твердых телах // УФН. 1970. Т.102. №4. С. 549-586.
4. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир. 1968. 482 с.
5. Руденко О. В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т.176. №1. С. 77-95.
6. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Особенности пространственной связи приливной компоненты сейсмических шумов с областями подготовки сильных землетрясений (по материалам долговременных режимных наблюдений на Камчатке) // Физика Земли. 2007. №9. С. 48-60.
7. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Синицын В.И., Чебров В.Н. 20 лет исследованию сейсмических шумов на Камчатке: от экспериментальных наблюдений к прогнозу землетрясений и моделированию // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. №1. Вып. 9. С. 37-50.
8. Салтыков В.А., Синицын В.И., Чебров В.Н. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // Вулканология и сейсмология. 1997. №4. С. 73-83.
9. Салтыков В.А., Чебров В.Н., Синицын В.И., Кугаенко Ю.А., Касахара М. Организация наблюдений сейсмических шумов вблизи сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 43-53.
10. Серебренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.
11. De Fazio T., Aki K., Alba I. Solid earth tide and observed change in the in situ seismic velocity // J. Geophys. Res. 1973. V.78. P. 1319-1323.
12. Reasenberg P., Aki K. A precise continuous measurement of seismic velocity for monitoring of in situ stress // J. Geophys. Res. 1974. V.79. P. 399-406.
13. Zaitsev V A model of anomalous acoustic nonlinearity of micro-inhomogeneous media // Acoust. Lett. 1996. V.19. №9. P. 171-176.
14. Zaitsev V., Gusev V., Zaytsev Yu. Mutually induced variations in dissipation and elasticity for oscillations in hysteretic materials: non-simplex interaction regimes // Ultrasonics. 2005. V.43. P. 699-709.