

УДК 681.883

**А.П. Шевченко<sup>1</sup>, П.А. Стародубцев<sup>1</sup>, Е.П. Стародубцев<sup>1</sup>, Е.Н. Бакланов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С.О. Макарова,  
690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6<sup>2</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**АКУСТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ОКЕАНА И УПРОЩЕННЫЙ  
ИНСТРУМЕНТАРИЙ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ В МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ  
С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ**

*Предложен инструментарий реализации акустической томографии океана, основанный на расчете разности фаз спектральных компонент просветного сигнала с элементами квазидифракционной томографии. Рассмотрено решение задачи с помощью мультистатической схемы, сформированной на базе одного излучателя и двух горизонтально-разнесенных пассивных приемников, а также операционно-вычислительного центра. На базе натурных измерений, выполненных в акватории Охотского моря и Курильской гряды, сделаны выводы о возможности применения описанного инструментария для эффективного прогнозирования сейсмоопасных явлений в морской среде.*

**Ключевые слова:** акустическая томография, просветный сигнал, мультистатическая схема, сейсмоопасные явления, фазовая синхронизация, возмущения морской среды.

**A.P. Shevchenko, P.A. Starodubtcev, E.P. Starodubtcev, E.N. Baklanov  
ACOUSTIC TOMOGRAPHY OF OCEAN AND SIMPLIFIED INSTRUMENT  
FOR ITS IMPLEMENTATION IN MULTISTATIC SCHEME FOR SAFETY  
OF NAVIGATION**

*Proposed the instrument for implementing the ocean acoustic tomography, based on the calculation of the phase difference of the spectral components of the clearance signal with elements of quasidiffractive tomography. Reviewed the solution of the problem with the multistatic scheme formed on the basis of one transmitter and two horizontally spaced passive receivers as well as operational data center. Briefly shown the operation of synchronization of the spectral components of phase spectrums of optimized signals between two horizontally spaced receiving elements, connected with chaotic oscillators and calculation of the phase difference between them. On the basis of field measurements made in the Sea of Okhotsk and the Kuril chain conclusions drawn about the possibility of using the described technique to effectively predict seismic hazards in marine environment.*

**Key words:** acoustic tomography, translucent signal, multistatic scheme, seismic hazard, phase synchronization, disturbance of the marine environment.

Анализ навигационных аварий с российскими судами за последние несколько десятков лет в Охотском и Беринговом морях показал, что в вопросах безопасности мореплавания особую роль играет своевременное предупреждение судовладельцев и населения об изменениях в навигационной и сейсмологической обстановке, возникающих в результате извержения вулканов и появления гигантских внутренних волн – цунами, а также детального их изучения при прибрежном плавании и стоянке в портах. Отсутствие такой информации, как показывает статистика, приводит к 70 % аварий с тяжелыми последствиями. Наиболее показательным является цунами в Северо-Курильске в 1952 г., повлекшее разрушение нескольких населённых пунктов Сахалинской и Камчатской областей.

На рубеже 80–90 гг. прошлого столетия для изучения структуры Мирового океана и решения данной задачи ведущими странами мира – США, Францией, Германией, Англией –

были проведены масштабные исследования состояния водной среды в Средиземном море и Атлантическом океане по результатам воздействия на нее мощных возмущений в рамках акустической томографии океана (АТО). Такие же исследования Мирового океана велись и научно-исследовательскими институтами РАН РФ: Институтом прикладной физики, Акустическим институтом имени академика Н.Н. Андреева, Институтом общей физики имени А.М. Прохорова.

Пик данных научных исследований для РФ приходится на начало XXI в., где большой вклад был внесен и дальневосточными учеными. Исследования в рамках концепции АТО ими велись в основном на акватории Охотского моря, частично – Берингова и Японского морей, а также в северо-западной части Тихого океана.

На практике концепция АТО реализовывалась в виде широкого спектра томографических подходов, различающихся по организации натуральных измерений. Наиболее используемой в практике проводимых исследований являлась идея «лучевой АТО», суть которой заключается в том, чтобы, расположив в пределах исследуемой акватории требуемое количество источников и приемников звука (рис. 1), восстановить пространственно-временную структуру неоднородностей морской среды по измеряемым вариациям времен распространения прошедших через среду звуковых сигналов [1].

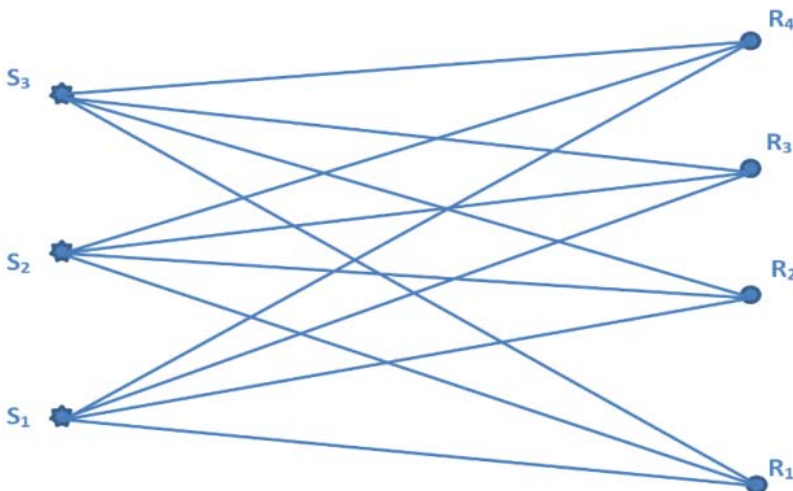


Рис. 1. Традиционная схема акустической томографии океана:

$S_1, S_2, S_3$  – источники;  
 $R_1, R_2, R_3, R_4$  – приёмники [1]

Fig. 1. Traditional scheme of ocean acoustic tomography:

$S_1, S_2, S_3$  – transmitters;  
 $R_1, R_2, R_3, R_4$  – receivers [1]

Ядром преобразований такой системы являются нелинейные уравнения, связывающие эти времена и поле скорости звука [1]:

$$t_i = \int_{z_i} \frac{ds}{c(x_i(s))}, \quad (1)$$

где  $t_i$  – время распространения;  $z_i$  и  $x_i$  – траектория  $i$ -го луча;  $c = c_0 + \delta c$  – поле скорости звука,  $c_0$  – априорно известное распределение скорости звука,  $\delta c$  – возмущение, вызванное:

- а) естественными изменениями водной среды  $\delta c_0$ ;
- б) цунами  $\delta c_1$ .

Реконструированным параметром является  $\delta c_1$ , а изучаемой морской неоднородностью – всевозможные возмущения морской среды [1]. Выбор в качестве носителя информации о среде «времени распространения просветных сигналов (ПС)» [2] оправдан тем, что для «времени» существует точное аналитическое выражение, даже в случае трехмерно-неоднородной среды. Другие характеристики ПС (интенсивность, модовый состав, угловой спектр) труд-

ноизмеримы или описываются приближенными выражениями, использование которых на больших дистанциях проблематично. Вычислительная часть задачи весьма трудоемка и связана с трёхмерностью ее общей постановки [2].

В целом, АТО подходит для длительных наблюдений сезонной и межгодовой временной изменчивости океанографических характеристик, в то время как другие (модовая, интерференционная, дифракционная, а также теоретически обоснованная авторами статьи «квазидифракционная», как бы дифракционная) томографии обладают преимуществами при зондировании мезомасштабных неоднородностей. Взаимодополняющие свойства всех томографий предполагают, что они могут эффективно комбинироваться в рамках единой системы наблюдений за подводной обстановкой, выполнять задачи обнаружения опасных природных явлений (внутренних волн-цунами) [2].

Но ввиду сложности технической реализации таких томографических схем эти направления не получили необходимого развития. И только в настоящее время, в связи с повышенной периодичностью проявления опасных природных явлений в дальневосточных морях, ученые (в том числе и авторы статьи) снова обратились к АТО (ее модификациям) и предложили упрощенный инструментарий их реализации в мультистатической схеме (МС) для обнаружения внутренних волн (цунами) и мезомасштабных неоднородностей [3].

Предложенный авторами статьи инструментарий реализации АТО основан в отличие от всех существующих подходов на расчете разности фаз спектральных компонент низкочастотных ПС мультистатической схемы, содержит все элементы «квазидифракционной» томографии, достаточно прост и имеет следующую последовательность математических операций и расчетов [4]:

- операция «деконволюции» принятых ПС;
- расчет общего энергетического спектра принятого ПС и его деление по пространственно-частотным диапазонам, характерным для различных возмущений морской среды, включая и цунами;
- расчет спектральной плотности ПС, перевод его в состояние оптимизированного;
- определение фазы всех спектральных компонент и общего фазового спектра оптимизированного сигнала;
- синхронизация спектральных компонент фазовых спектров оптимизированных сигналов между двумя горизонтально-разнесенными приемными элементами, связанными хаотическими осцилляторами, и расчет разности фаз между ними;
- построение трехмерных фигур разности фаз спектральных компонент фазовых спектров оптимизированных сигналов между двумя горизонтально-разнесенными приемными элементами;
- определение пространственного положения возмущения водной среды и эволюции его развития во времени и направлении движения.

Эксперименты, проведенные авторами статьи, показали, что такие исследования технологически и технически можно реализовать с помощью МС, сформированной на базе одного излучателя и двух горизонтально-разнесенных пассивных приемников, а также операционно-вычислительного центра, находящегося в месте установки пассивных приемников.

Несмотря на простоту предложенного томографического решения, все элементы инструментария рассмотреть одновременно будет достаточно сложно, и в данной научной статье будет кратко показана только операция синхронизации спектральных компонент фазовых спектров оптимизированных сигналов между двумя горизонтально-разнесенными приемными элементами, связанными хаотическими осцилляторами, и расчет разности фаз между ними. Все остальные математические операции и расчеты предложенного инструментария АТО будут рассматриваться в других научных статьях.

Процесс фазовой синхронизации является одной из важнейших проблем современной теории нелинейных колебаний. В основу фазовой синхронизации МС, находящейся в режиме динамического хаоса, был взят подход, предложенный в [5]. Для описания и анализа фазовой синхронизации была введена, как и в [5], фаза  $\varphi(t)$  хаотического сигнала. При этом под фазовой синхронизацией понимается только процесс захвата фаз спектральных компонент фазовых спектров оптимизированных сигналов, в то время как амплитуды спектральных компонент этих сигналов на первом этапе анализа остаются несвязанными друг с другом и выглядят хаотическими. Захват фаз «влечет» за собой поиск «совпадения» спектральных компонент сигналов. Частота хаотического сигнала определяется как средняя скорость изменения средней фазы:

$$\Omega = \langle \dot{\varphi}(e) \rangle. \quad (2)$$

В то же самое время для ряда систем (прежде всего, так называемых систем с плохо определенной фазой [4, 5]) описание явления фазовой синхронизации хаотических осцилляторов с помощью фазы  $\varphi(t)$  может приводить к некорректным результатам [4, 5].

В том случае, когда в спектре хаотического сигнала имеется одна ярко выраженная частота (частота сдвинутого ПС), фаза  $\varphi(t)$  хаотического сигнала фактически является фазой, ассоциированной с основной частотой ПС, при этом основная частота сдвинутого ПС и частота хаотического сигнала, как показала практика натурных исследований, могут совпадать [4, 5].

В случае когда в спектре нет доминирующей частотной компоненты, фаза хаотического сигнала  $\varphi(t)$  не может адекватно описывать динамику системы. Для подобных ситуаций в [4, 5] предложено было использовать семейство фаз  $\varphi_s(t)$ , вводимое с помощью непрерывного вейвлетного преобразования [4–6], при этом каждая из фаз  $\varphi_s(t)$  ассоциирована со своим временным масштабом  $s$ .

Это связано с тем, что для таких систем хаотическая временная реализация характеризуется Фурье-спектром, в котором отсутствует ярко выраженная основная спектральная дискрета (или таких спектральных дискрет несколько). Такой случай множества дискрет в спектре, несущих информацию о возмущениях морской среды, характерен для низкочастотных ПС, реализующих квазидифракционную томографию.

В этом случае явление фазовой синхронизации может проявляться (и это тоже было проверено на гидроакустической барьерной линии о. Итуруп – о. Сахалин) как синхронное поведение фаз связанных хаотических осцилляторов на определенных временных масштабах  $s$ , которые являются синхронизованными [4, 5]:

$$|\varphi_{s_1}(t) - \varphi_{s_2}(t)| < const. \quad (3)$$

В [4, 5] было показано, что по мере увеличения параметра связи между системами увеличивается диапазон синхронизованных масштабов до тех пор, пока все временные масштабы не будут синхронизованы, что соответствует установлению режима лаг-синхронизации [4, 5], когда состояния взаимодействующих осцилляторов оказываются сдвинутыми во времени друг относительно друга:  $\chi_1(t - \tau) \approx \chi_2(t)$ . Дальнейшее увеличение параметра связи ведет к уменьшению временного запаздывания  $\tau$ . Осцилляторы стремятся к режиму полной синхронизации  $\chi_1(t) \approx \chi_2(t)$ , вследствие чего разность фаз  $|\varphi_{s_1}(t) - \varphi_{s_2}(t)|$  стремится к нулю для всех временных масштабов.

Таким образом, введенное с помощью вейвлетного преобразования семейство фаз хаотического сигнала позволяет эффективно выявлять режим фазовой синхронизации связанных осцилляторов. В то же самое время непрерывное вейвлетное преобразование обладает более слабым разрешением в частотном диапазоне, нежели преобразование Фурье [4, 5]. Вейвлетное преобразование как бы «сглаживает» Фурье-спектр [4–6], при этом динамику временного масштаба  $s$  определяет не только спектральная составляющая Фурье-спектра  $f = 1/S$ , но и соседние частотные компоненты, при этом степень их влияния определяется как расположением этих компонент в Фурье-спектре, так и их интенсивностью.

Поэтому в том случае, когда два связанных хаотических осциллятора находятся в режиме лаг-синхронизации, их мгновенные фазы, соответствующие спектральной компоненте  $f$  Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$ , будут связаны между собой как  $\varphi_2(t) \approx \varphi_1(t) + 2\pi f t$ , а следовательно, разность фаз  $|\varphi_{s1}(t) - \varphi_{s2}(t)|$  должна подчиняться соотношению

$$\Delta\varphi_f = |\varphi_1(t) - \varphi_2(t)| = 2\pi f t. \tag{4}$$

Таким образом, на горизонтальной плоскости сечения возмущенной области от опасных природных явлений ( $\Delta\varphi_f, f$ ) точки, отвечающие за разности фаз спектральных компонент хаотических осцилляторов, находящихся в режиме лаг-синхронизации, должны располагаться вдоль прямой, имеющей угловой коэффициент  $k=2\pi\tau$  [4, 5].

Как было показано в [4, 5], при разрушении режима лаг-синхронизации (например, с уменьшением параметра связи между осцилляторами) и переходе систем в режим фазовой синхронизации часть временных масштабов  $s$  вейвлетных спектров выходит из синхронизма. Соответственно можно ожидать, что и часть спектральных компонент Фурье-спектров в режиме фазовой синхронизации также будет рассинхронизована, что будет проявляться в отклонении точек на плоскости ( $\Delta\varphi_f, f$ ) от прямой линии. При этом разумно полагать, что в первую очередь будут выходить из синхронизма те спектральные компоненты, на долю которых приходится малая доля энергии, тогда как спектральные компоненты в Фурье-спектрах, характеризующиеся большей долей энергии, будут оставаться синхронизованными и соответствующие им точки на плоскости ( $\Delta\varphi_f, f$ ) [4, 5] будут по-прежнему располагаться вдоль прямой линии. По мере дальнейшего уменьшения параметра связи все большая часть спектральных компонент будет выходить из состояния синхронизма, но до тех пор, пока наиболее «энергетические» компоненты будут синхронизованы, связанные системы будут демонстрировать режим фазовой синхронизации [4, 5].

В [4, 5] была использована количественная величина, характеризующая число спектральных компонент Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$ , находящихся в режиме синхронизма:

$$\sigma_L = \frac{\int_0^\infty H(S_1(f) - L)H(S_2(f) - L)(\Delta\varphi_{f_i} - 2\pi f t)^2 df}{\int_0^\infty H(S_1(f) - L)H(S_2(f) - L)df}, \tag{5}$$

где  $H(\xi)$  – (Функция Хевисайда);  $L$  – пороговый уровень мощности (измеряемый в децибелах), начиная с которого учитываются спектральные компоненты, а величина  $\tau$  определяется временным сдвигом частотной компоненты  $f_m$  спектров  $S_{1,2}(f)$ , характеризующейся наибольшим значением энергии:  $\tau = (\varphi_{f_m2} - \varphi_{f_m1}) / (2\pi f_m)$ . Величина  $\sigma_L$  [4, 5] является мерой степени фазовой синхронизации, она стремится к нулю в режимах полной и лаг-синхронизации. В режиме

фазовой синхронизации величина  $\sigma_L$  увеличивается по мере того, как выходят из синхронизма спектральные компоненты Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$  взаимодействующих осцилляторов.

При обработке реальных данных с гидроакустической барьерной линии о. Сахалин – о. Итуруп (используя методику [4, 5]) приходится иметь дело с дискретными временными рядами конечной длины, поэтому вместо непрерывного Фурье-преобразования необходимо использовать его дискретный аналог, а вместо интеграла использовать сумму [4, 5]:

$$\sigma_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\varphi_{f_i} - 2\pi f_i)^2, \quad (6)$$

где суммирование ведется по всем спектральным компонентам Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$ , уровень мощности которых превышает  $L$ .

Кроме того, при определении  $\sigma_L$  целесообразно проводить усреднение по набору временных реализаций [4, 5]. Вычисления над дискретно измеренными оптимизированными совокупностями ПС, принятых на горизонтально разнесенные приемники МС, позволили получить объемные фигуры реконструированных возмущений морской среды по результатам воздействия на нее опасных природных явлений.

При проведении численного моделирования синхронизации спектральных компонент фазового спектра были взяты реальные данные с дискретными временными рядами конечной длины (из эксперимента на гидроакустической барьерной линии о. Сахалин – о. Итуруп 2005 г.), поэтому вместо непрерывного Фурье-преобразования, как и в [4, 5], использовался его дискретный аналог. На рис. 2 показана зависимость величины коэффициента синхронизации  $\sigma_L$  от значения параметра связи  $\varepsilon$  между хаотическими осцилляторами (в случае МС – это пассивные приемники). Видно, что с увеличением  $\varepsilon$  величина  $\sigma_L$  стремится к нулю. Это свидетельствует о том, что в рассматриваемой МС наступил режим лаг-синхронизации. На рис. 3 иллюстрируется возрастание числа синхронизованных спектральных компонент Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$  по мере увеличения параметра связи: рис. 3, а соответствует случаю слабой фазовой синхронизации, когда этот режим только возник ( $\varepsilon = 0.08$ ); рис. 3, б, в, г соответствуют сильной кратковременной фазовой синхронизации ( $\varepsilon = 0.12$ ,  $\varepsilon = 0.22$ ,  $\varepsilon = 0.24$ ).

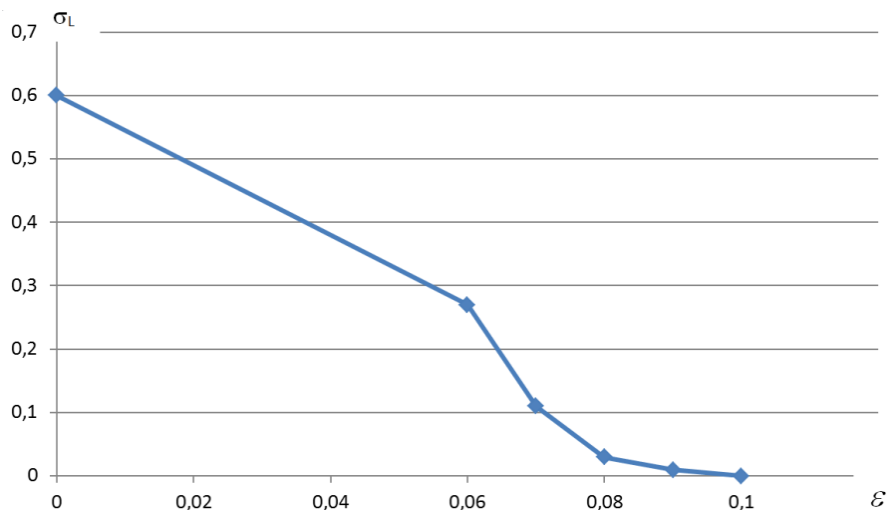


Рис. 2. Зависимость величины  $\sigma_L$  от значения параметра связи  $\varepsilon$   
Fig. 2. The dependence of  $\sigma_L$  of the value of link parameter  $\varepsilon$

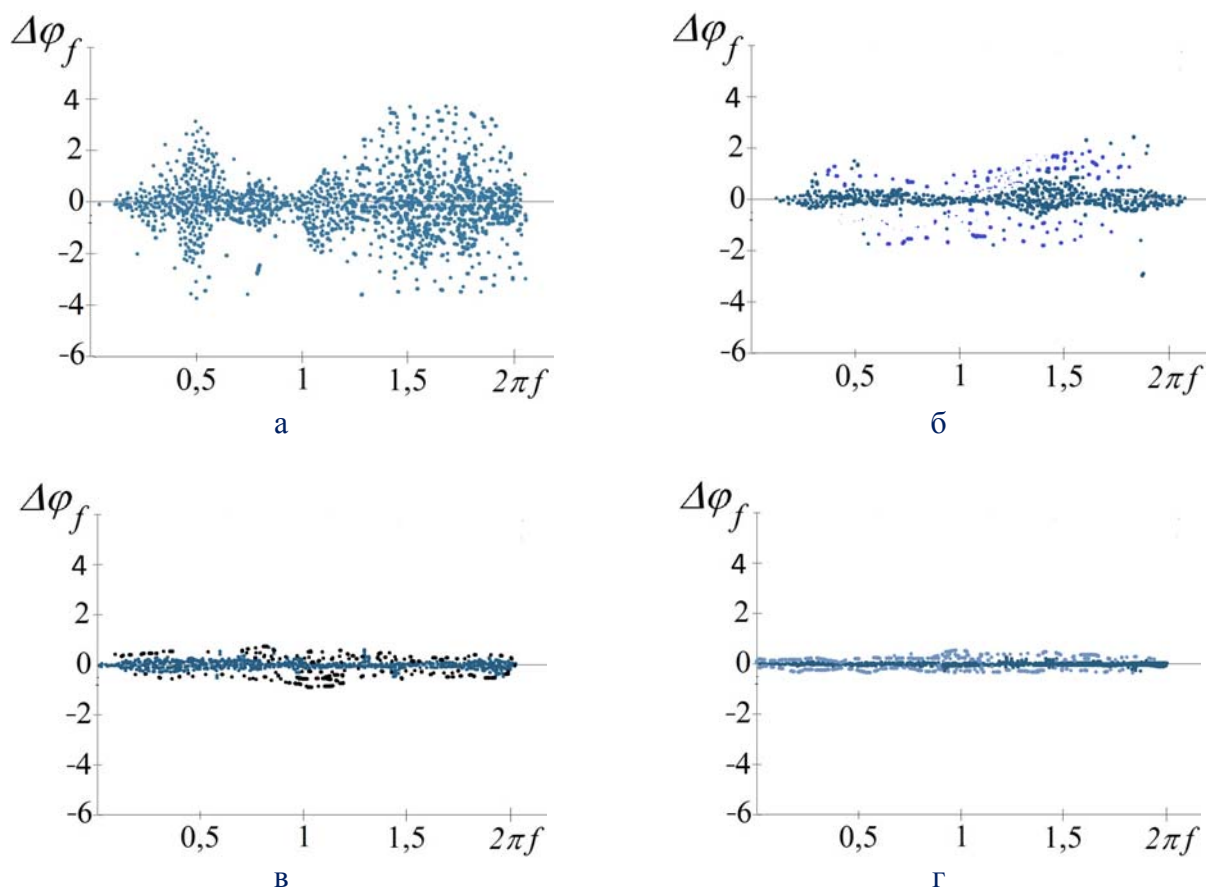


Рис. 3. Разность фаз  $\Delta\varphi_i$  для различных частотных компонент  $f$  Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$  связанных систем Ресслера (длина временной реализации  $\chi(t)$  – 170 единиц безразмерного времени, шаг дискретизации  $h = 0,13$ , усреднение проводилось по 40 отдельным временным реализациям, взятым за 1,5 ms на оба пассивных приёмника МС) [3–5]

Fig. 3. Difference in phase  $\Delta\varphi_i$  for different frequency components  $f$  of Fourier spectrums  $S_{1,2}(f)$  of related Rossler systems (length of the time series  $\chi(t)$  – 170 units of the dimensionless time, sampling step  $h = 0,13$ , averaging carried out on 40 separate implementation time taken for 1,5 ms both passive receivers) [3 – 5]

По результатам обработки данных, представленных на рис. 3, а, б, в, г были сделаны следующие выводы. С учетом условий распространения низкочастотного ПС и наличия (или отсутствия) мезомасштабных неоднородностей в морской среде, первым анализируется и уточняется энергетический спектр совокупности сигнала, принятого на ближний по расстоянию от излучателя приемник. Затем в ближайшем к излучателю приемнике определяется фазовый спектр. На основании этого спектра вырабатываются показатели для каждой спектральной компоненты по пределам изменения мгновенной фазы и частотного интервала, в котором она может находиться.

В случае (см. рис. 3, б) когда в энергетическом спектре сигнала отсутствуют спектральные компоненты ПС, над ним проводится операция компрессии через аддитивный компенсатор помех. Данная операция позволяет путем набора оптимальных весовых окон выявлять и усиливать спектральные компоненты, отсутствующие в первичном Фурье-спектре, и уменьшать влияние наиболее интенсивных спектральных компонент. Наиболее устойчивой синхронизацией и минимальным масштабом изменения фазы обладают наиболее интенсивные спектральные компоненты пространственного спектра мезомасштабной неоднородности.

Они быстрее всего входят в режим лаг-синхронизации и выходят из него. Эти же спектральные компоненты дают наименьшую разность фаз (набег фаз). Это объясняется тем, что они являются производной от воздействия на водную среду (например, цунами), более мощные относительно исходных спектральных компонент ПС и менее подвержены затуханию из-за низкочастотности.

Наименее устойчивыми к синхронизации являются наименее интенсивные спектральные компоненты, которые имеют наибольший фазовый масштаб.

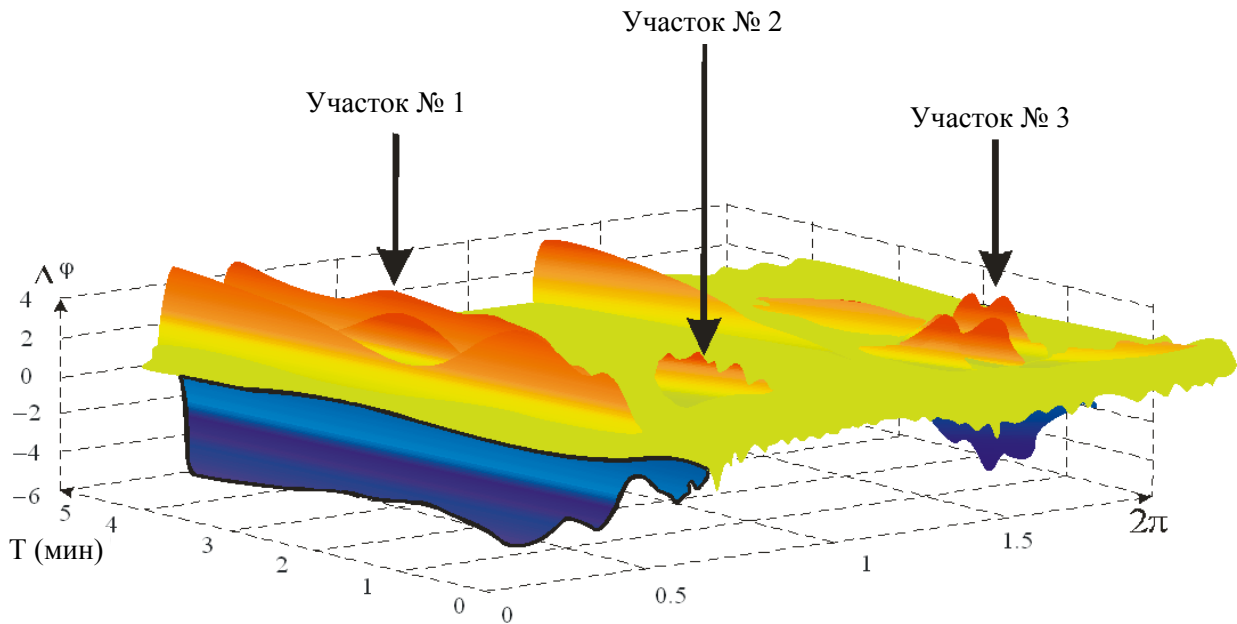


Рис. 4. Динамика изменения амплитуды спектральных характеристик тональных сигналов для первого и второго этапов эксперимента при различных типах гидрологии за период нахождения Т-волны в зоне гидроакустической барьерной линии [7]: участок № 1 – спектры первичного взаимодействия ПС с внутренней волной от цунами; участок № 2 – спектры излученного ПС; участок № 3 – спектры совместного распространения ПС и неоднородности морской среды

Fig. 4. Dynamics of changes in the amplitude of the spectral characteristics of tones for the first and second phases of the experiment with different types of hydrology during the period when the T wave in the area of sonar barrier line [7]: area № 1 – spectra of translucent signal primary interaction with the internal wave from the tsunami; area № 2 – spectrum of the emitted translucent signal; area № 3 – spectrum sharing signal propagation and heterogeneity of the marine environment

Они быстрее всего выходят из режима лаг-синхронизации и имеют максимальную разность фаз. Как показала практика натуральных исследований, в основном это спектральные компоненты исходного Фурье-спектра низкочастотного ПС.

В качестве экспериментальных исследований для проверки предложенного инструментария, но через относительную интенсивность принятого сигнала ( $I$ , дБ), были взяты натурные данные из отчета «Контроль акваторий Охотоморского региона с использованием гидроакустических измерительных систем, поиск предвестников землетрясений», выполненного в рамках гранта РФФИ СКБ САМИ (г. Южно-Сахалинск) в 2004 г. (рис. 5, 6) [8].

В этих измерениях наиболее существенным является измерение сейсмогидроакустическими станциями СКБ САМИ в южной части Охотского моря акустической компоненты землетрясения (Т-волны). Она генерируется островами Курильской гряды при ударном воздействии на них сейсмических волн от землетрясения. Скорость распространения Т-волн усту-



падет скоростям сейсмических компонент и примерно равна 1,5 км/с, но она слабо затухает и распространяется на очень большие расстояния. Вследствие уникальности географического взаиморасположения островов Курильской гряды и приемных баз СКБ САМИ существует возможность определять местонахождение эпицентра землетрясения по задержкам времен прихода (разности фаз спектральных компонент) Т-волн, генерируемых этими областями. Т-волна не всегда зарождается непосредственно на морском дне в зоне действия очага землетрясения, но в ее записи всегда содержится неискаженная информация из района воздействия землетрясения на морское дно, которая может быть использована при анализе сейсмограмм Р- и S-волн по гидроакустическим всплескам, по крайней мере, в качестве дополнительной [9].

Рис. 5. Запись акустических колебаний – предвестников землетрясений (A –  $f = 10\text{--}30$  Гц; B –  $f = 3\text{--}10$  Гц; C –  $f = 0,8\text{--}1,8$  Гц) [8]  
 Fig. 5. Recording acoustic oscillations of earthquake precursors (A –  $f = 10\text{--}30$  Hz; B –  $f = 3\text{--}10$  Hz; C –  $f = 0,8\text{--}1,8$  Hz) [8]

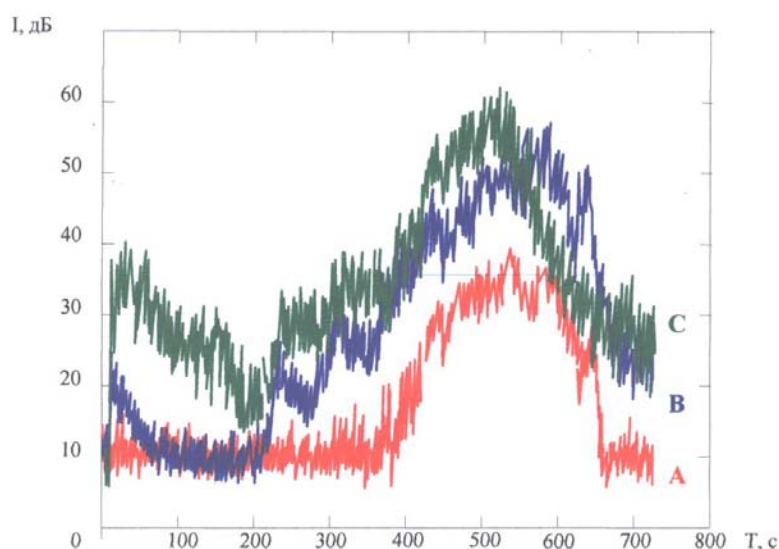
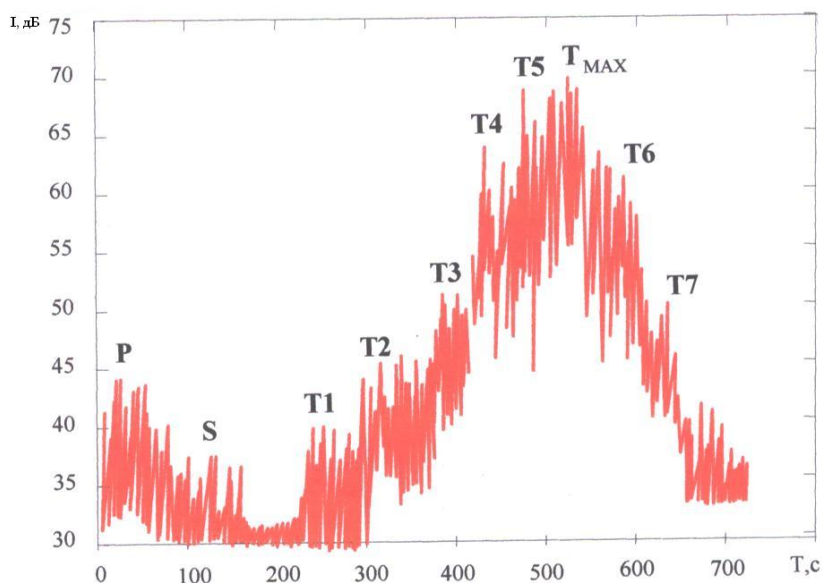


Рис. 6. Запись акустических колебаний – предвестников землетрясений в случае многолучевого распространения (P, S, T) волн [8]  
 Fig. 6. Recording acoustic vibrations of earthquake precursors in the event of multipath wave [8]



Использование мультистатической схемы и рекурсивного прогнозирования позволяют выделять Т-волну из общего сигнала, формировать ситуационные модели перед сейсмо- и цунами-опасностью. Как показали расчеты, общий запас времени для принятия решения и

предупреждения соответствующих инстанций о приближении этих природных явлений составляет от десяти часов до суток, что значительно больше, чем при существующих системах прогнозирования и предупреждения.

### Список литературы

1. Гончаров, В.В. Акустическая томография океана / В.В. Гончаров, В.Ю.Зайцев, В.М. Куртепов, А.Г. Нечаев, А.И. Хилько. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997. – С. 255.
2. Стародубцев, П.А. Обоснование практических путей построения низкочастотных томографических систем контроля гидрофизических полей морских акваторий / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, Л.Э. Карачун // Сейсмоакустика переходных зон: материалы докл. 4-го Всерос. симп. 5-9 сентября 2005 г., РАН, Дальневост. отделение, ТОИ им. В.И. Ильичева. – Владивосток, 2005. – С. 202–206.
3. Стародубцев, П.А. Мультистатистическая схема дальнего обнаружения опасных природных явлений в целях обеспечения безопасного мореплавания / П.А. Стародубцев, Е.П. Стародубцев, В.В. Карасев // Исследования Мирового океана: сб. докл. Междунар. науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения И.В. Кизеветтера. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2008. – С. 294–299.
4. Стародубцев, П.А. Синхронизация спектральных компонент оптимизированной совокупности сигналов, связанных хаотическими осцилляторами / П.А. Стародубцев, Е.П. Стародубцев, С.В. Гутарова // Пробл. и метод. разраб. и эксплуат. вооружен. и воен. техн. ВМФ: сб. ст. – Владивосток: МО РФ, ТОВМИ, 2008. – Вып.67. – С. 234–239.
5. Стародубцев, П.А. Метод расчёта семейства функций Бесселя с помощью БПФ при реализации теоретических основ активно-пассивной низкочастотной томографии / П.А. Стародубцев, А.Н. Иванов, А.А. Жевагин // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Техн. науки. – Новочеркасск, 2006. – № 3. – С. 22–26.
6. Методические разработки прогноза сильных землетрясений гидроакустическими методами / У Тон Иль, А.А. Таболяков, В.Н. Храмушин; под ред. В.Н. Храмушина // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана: сб. ст. – Владивосток: ДВО РАН, 2005. – Вып. 1. – 192 с.

**Сведения об авторах:** Шевченко Александр Петрович, e-mail: vunc-vmf-tovmi@mail.ru;  
Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: spa1958@mail.ru;  
Стародубцев Евгений Павлович, e-mail: spa1958@mail.ru;  
Бакланов Евгений Николаевич, доцент, e-mail: baklanoven@mail.ru.