

УДК 534.222

© Л.Е. Собисевич, д.т.н., проф., главный научный сотрудник  
лаборатории прикладной геофизики и вулканологии 703;

А.Л. Собисевич, д.ф.-м.н., с.н.с., зав. лабораторией прикладной  
геофизики и вулканологии 703

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва (Российская Федерация)

## **СЕЙСМОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ КВАЗИПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ В СИСТЕМЕ «ЛИТОСФЕРА – ОКЕАН – АТМОСФЕРА»**

В статье изложена феноменологическая теория квазипоперечных волновых полей, которые возникают в системе «литосфера – океан – атмосфера». Впервые волновые структуры этого типа были выделены А.А. Барихиным и Л.Е. Собисевичем в 60-е годы прошлого столетия при обработке данных экспериментальных наблюдений, связанных с изучением условий трансформации низкочастотных акустических полей в сложных геолого-гидрофизических условиях, характерных для ряда прибрежных районов Черного моря.

### **КВАЗИПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ, СЕЙСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, РЭЛЕЕВСКИЕ ВОЛНЫ, СЕЙСМОГИДРОАКУСТИКА, МИКРОСЕЙСМЫ, ПОЛУПРОСТРАНСТВО**

До настоящего времени вопросам, связанным с анализом низкочастотных квазипоперечных волновых структур и сопутствующих им сейсмогидроакустических процессов в океане, уделялось недостаточное внимание, по крайней мере, с точки зрения оценки роли и значения векторно-фазовых характеристик генерируемых и трансформируемых акустических, сейсмогидроакустических, гидроакустических и сейсмоакустических волновых полей. В то же время проблема приема низкочастотной, сейсмоакустической и сейсмогидроакустической информации сосредоточенными и распределенными векторно-фазовыми измерительными системами автономного, бортового или скважинного (донного) типа сегодня приобретает особый интерес в связи с развитием новых методов разведки полезных ископаемых на шельфе морей и океанов.

В 1885 году английский ученый лорд Рэлей (Дж. Стретт) теоретически показал, что вдоль плоской границы твердого упругого полупространства с вакуумом или достаточно разреженной средой (например, с воздухом) могут распространяться волны, амплитуда которых быстро спадает с глубиной. Эти волны, названные впоследствии рэлеевскими, являются одним из основных типов поверхностных волн, наблюдающихся при землетрясениях. В ряде практически встречающихся случаев под волнами Рэля понимают волны не только на свободной границе упругого полупространства с вакуумом, но также поверхностные волны более общего вида, возникающие на границе упругого полупространства с жидкостью, как это имеет место в море.

Рэлеевские волны, распространяясь вдоль границы раздела, всегда несут информацию об источниках звука их породивших и о строении среды, как в упругом полупространстве, так и в жидкости. Именно поэтому большая роль отводится им в настоящее время в связи с применением сейсмических методов в задачах изучения глубинного строения земной коры, морского дна и в задачах разведки полезных ископаемых, как на суше, так и в океане.

Однако существует ряд гидрофизических задач, не получивших достаточно полного освещения в специальной литературе. К их числу следует отнести задачи о распространении акустической энергии в слоистых структурах типа «литосфера – океан – атмосфера», когда

частота сигнала изменяется от сотых долей Герца до нескольких Герц, а источник поля находится в воздухе, воде или в грунте.

В фундаментальной постановке затронутые выше задачи впервые были рассмотрены в известной монографии академика Л.М. Бреховских [1]. Тем не менее, существует еще ряд интересных вопросов, которые необходимо изучать и развивать как в фундаментальном, так и в прикладном плане [2-4].

Так, например, известно, что вследствие изменения скорости звука с глубиной в океане возникают условия для существования звукового канала. Структура этого канала, положение максимумов и минимумов скорости распространения звуковых волн определяются в значительной степени характером распределения температуры, солености и рядом других физико-химических условий, которые изменяются как в пространстве, так и во времени.

Однако, при переходе к очень низким частотам характер волновых процессов в море определяется уже масштабным сейсмогидроакустическим волноводом, образованным поверхностями раздела вода-воздух и вода-дно. Этот волновод имеет ряд отличительных особенностей, которые могут представить значительный интерес в свете решения прикладных задач. К числу таких особенностей относится, например, тот факт, что основные параметры сейсмогидроакустического волновода, определяющие условия распространения колебательной энергии, практически устойчивы во времени. Характерные особенности присущи и самому сейсмогидроакустическому полю, которое в ряде случаев может быть использовано для построения измерительных систем.

Таким образом, настало время изучить квазипоперечные поля и проанализировать условия распространения энергии в сейсмогидроакустическом диапазоне частот, имея целью решение ряда прикладных гидрофизических задач.

### 1. Элементы теории сейсмогидроакустических квазипоперечных волновых полей

Рассмотрим структуру инфразвукового поля, возникающего в море при распространении акустических волн, принимая во внимание наличие нижнего упругого полупространства и то обстоятельство, что на первом этапе исследований, с точки зрения постановки и решения ряда прикладных задач, наибольший интерес представляют достаточно общие закономерности, определяющие распространение микросейсмических колебаний. В этой связи ограничимся двумерной постановкой задачи (см. рис. 1): ось  $X$  декартовой системы координат направим горизонтально, ось  $Z$  — вертикально, а от оси  $Y$  никакой зависимости здесь не предполагается. Начало координат поместим на границе раздела «вода - дно». В водном слое  $H$  распространение гидроакустических колебаний определяется уравнением вида:

$$\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial t^2} - c^2 \Delta \operatorname{div} \bar{v} = 0, \quad (1.1)$$

где  $\bar{v}$  — колебательная скорость частиц жидкости;

$c$  — скорость звука в воде;

$t$  — время.

При изучении условий формирования и распространения акустической энергии в низкочастотной области будем учитывать влияние дна. Распространение сейсмических волн в дне океана определяется системой уравнений теории упругости для смещений  $\bar{U}$  :

$$\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} + c_1^2 \operatorname{rot} \operatorname{rot} \bar{U} - c_2^2 \Delta \operatorname{div} \bar{U} = 0, \quad (1.2)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – скорости поперечных и продольных волн соответственно.

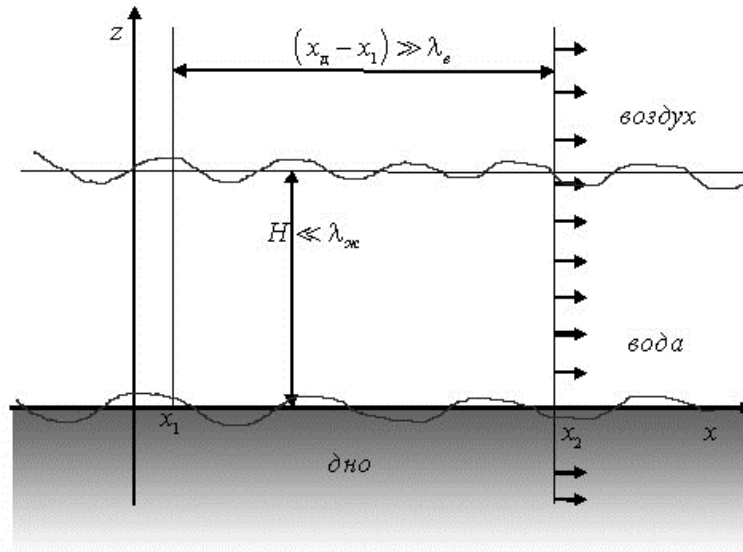


Рис. 1.1 - Геометрия задачи

Рассмотрим сейсмогидроакустическое поле, определяемое структурой и уровнем реально существующих микросейсм на больших удалениях от шумящего объекта, где фронт волны в жидкости естественно считать плоским. В этом приближении можно допустить, что плоская волна распространяется горизонтально (например, в положительном направлении оси  $X$ ), а зависимость от координаты  $X$  и времени  $t$  для  $\bar{v}$  и  $\bar{U}$  естественно принять в виде:

$$\exp\{i(\omega t - kx)\},$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,

$k = 2\pi/\lambda$  – волновое число бегущей волны.

Тогда общее решение уравнений (1.1) и (1.2) будет иметь вид:

– для жидкого слоя:

$$\begin{aligned} v_z &= \left( A \operatorname{sh} \left\{ \sqrt{1 - \zeta^2} kZ \right\} + B \operatorname{ch} \left\{ \sqrt{1 - \zeta^2} kZ \right\} \right) \exp\{i(\omega t - kx)\} \\ v_x &= -\frac{i}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \left( A \operatorname{ch} \left\{ \sqrt{1 - \zeta^2} kZ \right\} + B \operatorname{sh} \left\{ \sqrt{1 - \zeta^2} kZ \right\} \right) \exp\{i(\omega t - kx)\}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

– для упругого однородного полупространства, подстилающего слой жидкости и моделирующего в первом приближении дно океана:

$$U_z = \left( C \exp \left\{ \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_1^2} \zeta^2} kZ \right\} + D \exp \left\{ \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_2^2} \zeta^2} kZ \right\} \right) \exp \{ i(\omega t - kx) \},$$

$$U_x = -\frac{i}{k} \left( C \frac{\exp \left\{ \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_1^2} \zeta^2} kZ \right\}}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{c_1^2} \zeta^2}} + D \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_2^2} \zeta^2} \exp \left\{ \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_2^2} \zeta^2} kZ \right\} \right) \exp \{ i(\omega t - kx) \}. \quad (1.4)$$

В соотношениях (1.3) и (1.4)  $\zeta = \frac{\tilde{n}_i}{c} \equiv \frac{\omega}{kc}$  – есть приведенная к скорости звука скорость распространения изучаемой волны. Решение (1.4) выбрано так, чтобы оно экспоненциально затухало с глубиной, т.е. в отрицательном направлении оси  $Z$ . Давление в гидроакустической волне, определяемое в наших предположениях как:

$$p = i \left( \frac{c^2 \rho}{\omega} \right) \operatorname{div} \bar{V},$$

имеет в соответствии с (1.3) вид:

$$p = -\frac{ic\rho\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \left( A \operatorname{ch} \left\{ \sqrt{1-\zeta^2} kZ \right\} + B \operatorname{sh} \left\{ \sqrt{1-\zeta^2} kZ \right\} \right) \exp \{ i(\omega t - kx) \}, \quad (1.5)$$

т.е.

$$p = \rho c \zeta v_x, \quad (1.6)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости.

Как правило, в задачах на собственные значения, коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  определяются через один неопределенный множитель после подстановки решений (1.3) и (1.4) в граничные условия, которые диктуют:

– равенство нулю давления на верхней границе (граница раздела воздух - вода), т.е.  $p(H) = 0$ ;

– непрерывность смещений и давлений (напряжений) на границе жидкости и твердого полупространства, т.е.:

$$V_{z(0)} = \frac{\partial U_z}{\partial t} \Big|_{z=0}; \quad V_{x(0)} = \frac{\partial U_x}{\partial t} \Big|_{z=0}; \quad P(0) = \sigma_{zz},$$

или, если учесть, что  $\sigma_{ik} = \lambda \operatorname{div} U \delta_{ik} + \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial X^k} + \frac{\partial U_k}{\partial X^i} \right)$ , где  $\lambda$  и  $\mu$  – упругие постоянные Ламэ, а  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера, то:

$$\delta_{zz} = \lambda \operatorname{div} U + 2\mu \frac{\partial U_z}{\partial t},$$

и, следовательно,

$$P(0) = \lambda \operatorname{div} U + 2\mu \frac{\partial U_z}{\partial Z} \Big|_{Z=0}.$$

Ограниченность смещений на бесконечности в твердом полупространстве. Последнее условие уже было учтено при выборе вида решения (1.4).

Как условие совместимости системы уравнений для определения коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , после подстановки (1.3) и (1.4) в граничные условия получим трансцендентное уравнение, которое связывает скорость и волновое число бегущей волны:

$$\operatorname{ctg} \chi \sqrt{\zeta^2 - 1} = \frac{\zeta^4 \frac{c^4}{c_1^4} \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_2^2} \zeta^2}}{4\eta \sqrt{\zeta^2 - 1} \left[ \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_1^2} \zeta^2} \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_2^2} \zeta^2} - \left( 1 - \zeta^2 \frac{c^2}{2c_1^2} \right)^2 \right]}, \quad (1.7)$$

здесь  $\chi = \frac{2\pi H}{\lambda}$  приведенное к глубине моря (толщине жидкого слоя) волновое число распространяющегося возмущения,

$\eta = \rho_2 / \rho$  – отношение плотностей для упругого полупространства (дна) и воды.

Скорость смещения и давление в бегущей сейсмогидроакустической волне представляется возможным определить теперь выражениями вида:

$$\begin{aligned} V_z &= i \frac{A}{\sin(\chi \sqrt{\zeta^2 - 1})} \cos \left[ \left\{ (\chi - kz) \sqrt{\zeta^2 - 1} \right\} \exp \{ i(\omega t - kx) \} \right] \\ V_x &= - \frac{A}{\sqrt{\zeta^2 - 1} \sin(\chi \sqrt{\zeta^2 - 1})} \sin \left[ \left\{ (\chi - kz) \sqrt{\zeta^2 - 1} \right\} \exp \{ i(\omega t - kx) \} \right] \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$P = \rho c \zeta v_x.$$

Трансцендентное уравнение (1.7) определяет набор собственных значений  $\zeta$  и  $\chi$ , для каждого из которых существует определенная мода бегущей волны. Зависимости

приведенной скорости  $\zeta = \tilde{n}_i/c$  от приведенной длины волны для трех низших пар значений  $\zeta$  и  $\chi$ , представлены на рис. 1.2 и 1.3.

При расчете указанных зависимостей были взяты наиболее приемлемые с геофизической точки зрения исходные соотношения:  $c=1,5$  км/сек,  $c_1=3$  км/сек,  $c_2=5,2$  км/сек,  $\eta=2,5$ .

Анализируя приведенные на рис. 1.2 и рис. 1.3 данные, следует особое внимание обратить на низшую моду, которая принципиально отличается от остальных, высших мод колебаний.

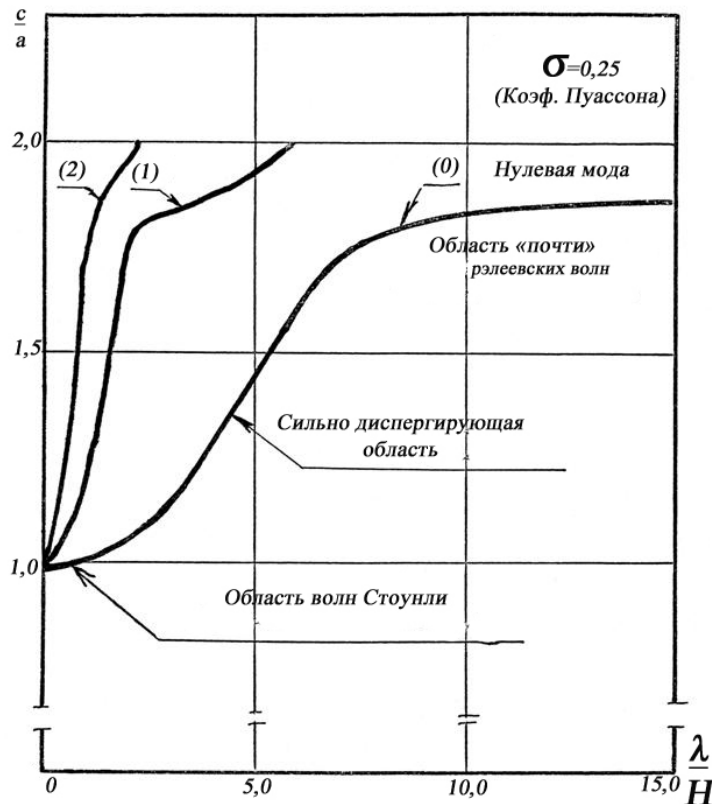


Рис. 1.2 - Дисперсионные кривые для нормальных волн в случае жидкого слоя, лежащего на упругом полупространстве

Во-первых, для низшей моды дисперсия микросейсм существенно меньшая и можно выделить участки в области длинных ( $\lambda \gg H$ ) и коротких ( $\lambda \ll H$ ), с точки зрения глубины  $H$ , длин волн, где эта дисперсия незначительна.

Если теперь обратиться к соотношениям (1.8) и (1.4), то можно показать, что недисперсионный участок в области коротких микросейсм соответствует волнам, распространяющимся вдоль границы «дно - водная среда». Действительно, в этом случае  $\zeta < 1$  и  $\chi$  достаточно велико ( $\chi \gg 1$ ). При этом тригонометрические функции в (1.8) переходят в гиперболические, экспоненциально спадающие вдоль положительного направления оси  $Z$ , т.е. в направлении от дна моря к поверхности. Однако, хотя дисперсия в этом случае и мала, малость длин волн указывает на то, что эти составляющие микросейсмического поля можно использовать преимущественно в локальных измерительных системах. Действительно, во-первых, эти волны сосредоточены вблизи дна и, во-вторых, что более важно, короткие волны могут испытывать значительное рассеяние на неоднородностях рельефа дна. Именно эти

замечания и определяют класс взаимодействий, где придонные сейсмогидроакустические поля, структура которых зависит от условия возникновения и распространения волн Стоунли, могут быть использованы в прикладных задачах.

Значительный интерес с точки зрения широкого класса прикладных задач представляет низкочастотная ветвь низшей моды бегущих сейсмогидроакустических волн. Последнее легко объяснить, если учесть, что она обладает небольшой дисперсией по сравнению как с высшими модами колебаний, так и с чисто гидроакустическими волнами в подводном звуковом канале. Кроме того, большая длина волны означает незначительное рассеяние на неоднородностях рельефа дна и осадочных слоев. И, наконец, последнее обстоятельство, на которое следует обратить особое внимание. Как следует из соотношения (1.8), при малых  $\chi$  ( $\chi \ll 1$ ) и  $\zeta \div 1,8 \times 1,84$  скорости смещений в сейсмогидроакустических волнах почти постоянны по глубине и имеют одну очень характерную особенность, а именно: вертикальная компонента превосходит по величине горизонтальную компоненту. А это значит, что в море глубины  $H$  при  $\lambda \gg H$  можно выделить особый тип сейсмогидроакустических волн – квазипоперечные волны, которые распространяются в горизонтальном направлении (вдоль оси  $X$ ). При этом смещения частиц жидкости в квазипоперечной волне имеют преимущественно вертикальное направление. Квазипоперечные волны несут информацию о микросейсмах в океане.

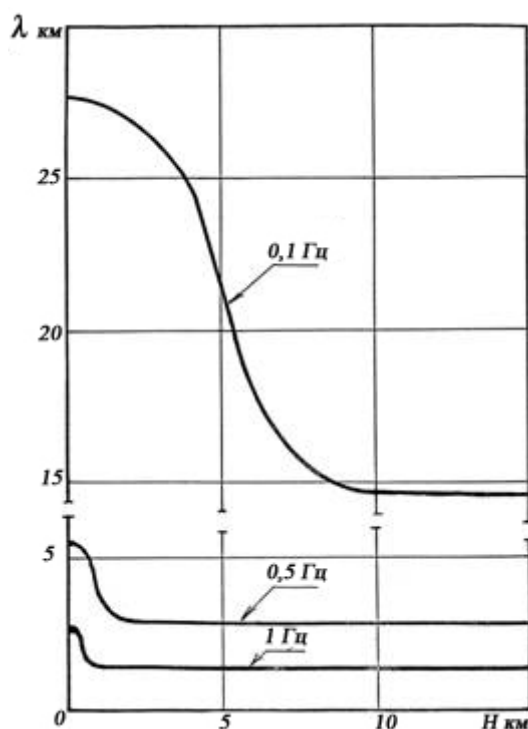
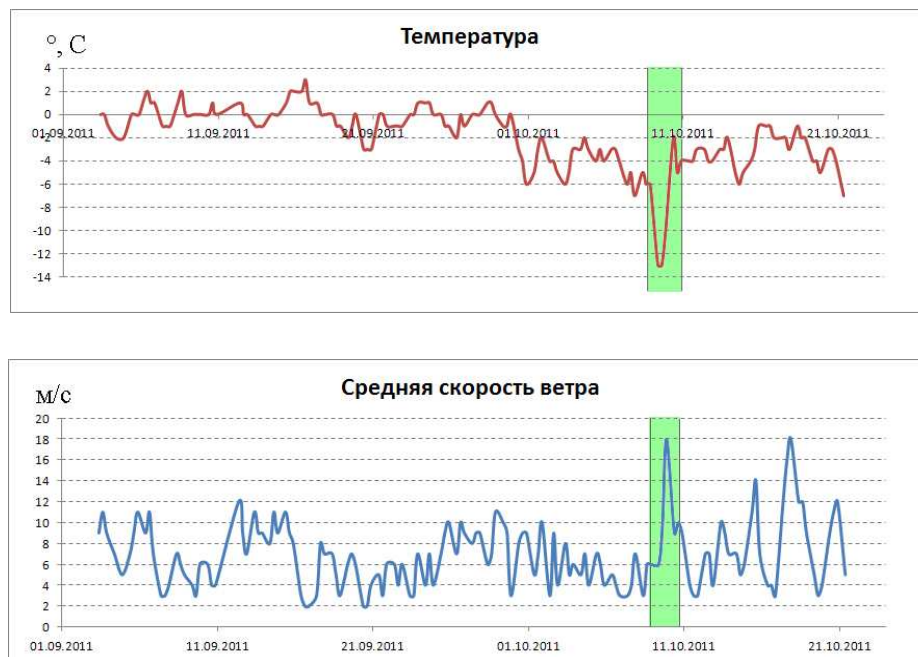


Рис. 1.3 - Зависимость длины нормальной бегущей волны от глубины жидкого слоя

Отметим, что изучение уровней микросейсмов на океаническом дне проводятся регулярно. Однако измерения спектров квазипоперечных волн и микросейсм в открытом океане практически не проводились. Следовательно, как изменение области источника микросейсма для частных штормовых явлений, так и характеристики распространения микросейсм в волноводе «атмосфера - океан – литосфера» не очень хорошо известны. Анализ микросейсмического движения частиц и фазовых отношений, как на океаническом

дне [5], так и на суше [6], показывал, что микросейсмы распространяются преимущественно как основная мода волн Рэлея. При проведении донных измерений обычно применяют морские сейсмографы. Для регистрации квазипоперечных составляющих геоакустического поля в морской среде на некотором удалении от дна необходимо применять взвешенные в жидкости воспринимающие элементы векторного типа (приемники колебательного ускорения или скорости).

Галина Антоновская из Института проблем экологии севера УРО РАН любезно предоставила нам данные анализа микросейсмического фона в отдельном районе на шельфе Северного ледовитого океана (о. Александры, Земля Франца-Иосифа).



*Рис. 1.4. - Вариации температуры воздуха и средней скорости ветра в сентябре-октябре 2011 г. в районе расположения сейсмической станции (индекс ZFI) по данным метеостанции «Нагурская». Зеленой полосой показана область резкого изменения температуры воздуха и усиления скорости ветра*

В сентябре температура воздуха колебалась незначительно, изменяясь от -3 до +3 градусов, а скорость ветра не превышала 12 м/с. В целом состояние атмосферы в этот период можно считать спокойным. Уровень и спектральные характеристики микросейсмического фона в спокойные дни сентября (начало, середина и конец месяца) представлен на рис. 1.5 - рис. 1.10.



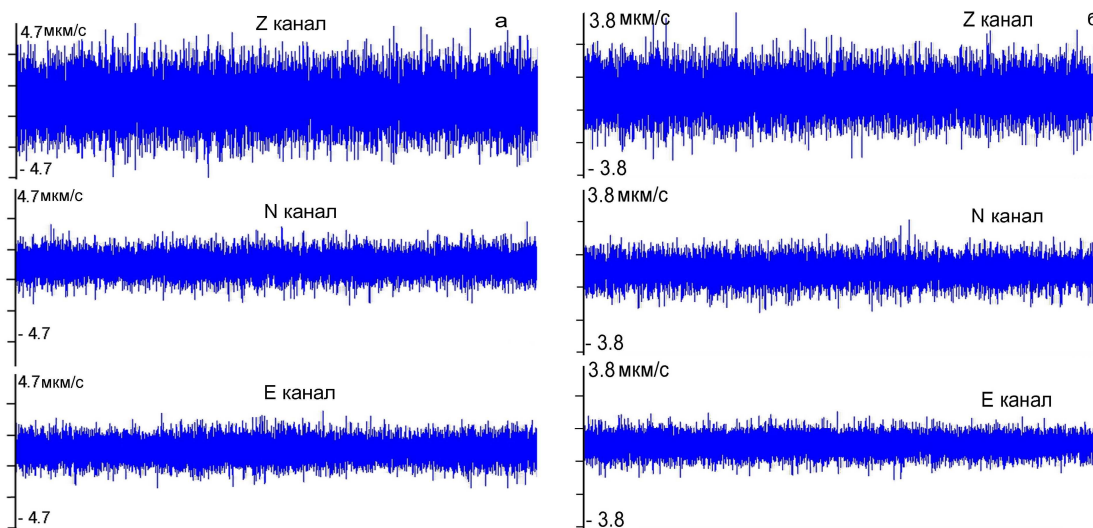


Рис. 1.5. Характерный микросейсмический фон для начала сентября:  
а – ночное время; б – дневное время

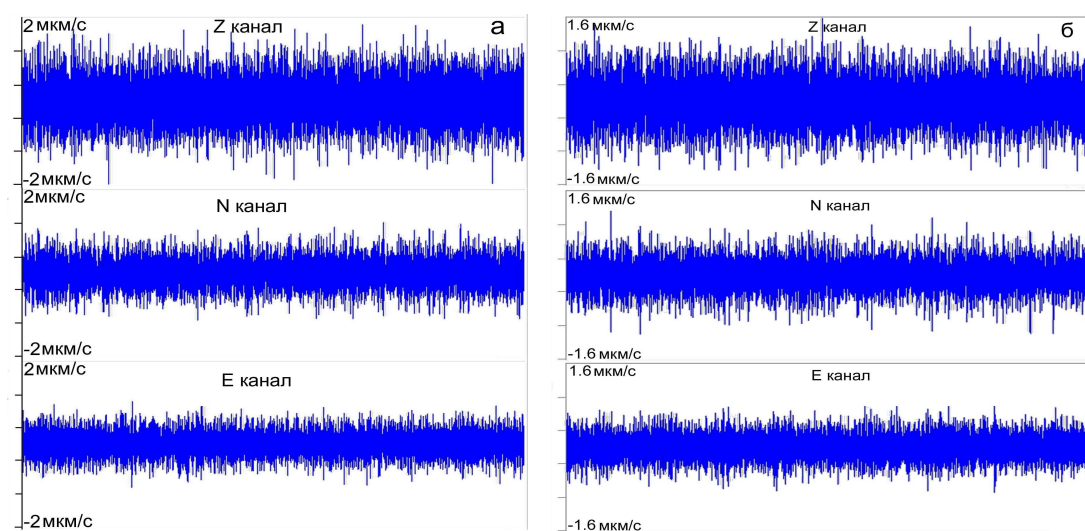


Рис. 1.6. Характерный микросейсмический фон для середины сентября:  
а – ночное время; б – дневное время

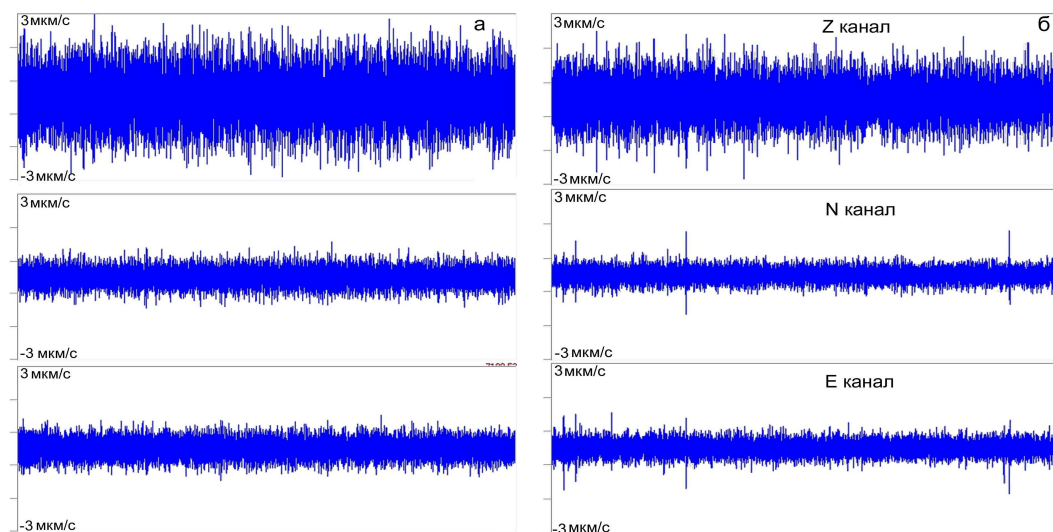


Рис. 1.7. Характерный микросейсмический фон для конца сентября:  
а – ночное время; б – дневное время

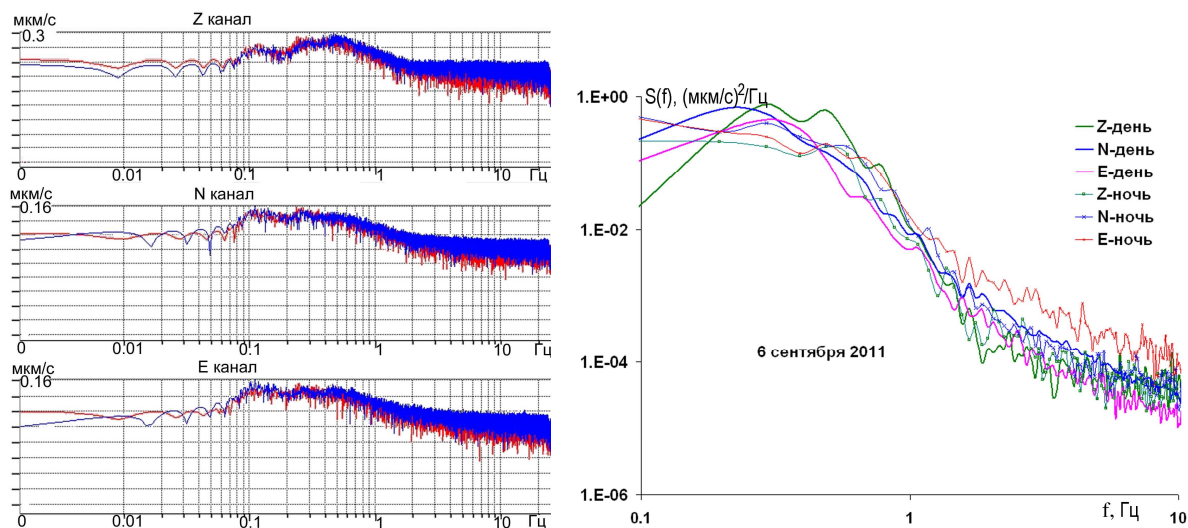


Рис. 1.8. Сравнение амплитудных спектров (слева) и спектров мощности (справа) микросейсмического фона для дня и ночи для начала сентября

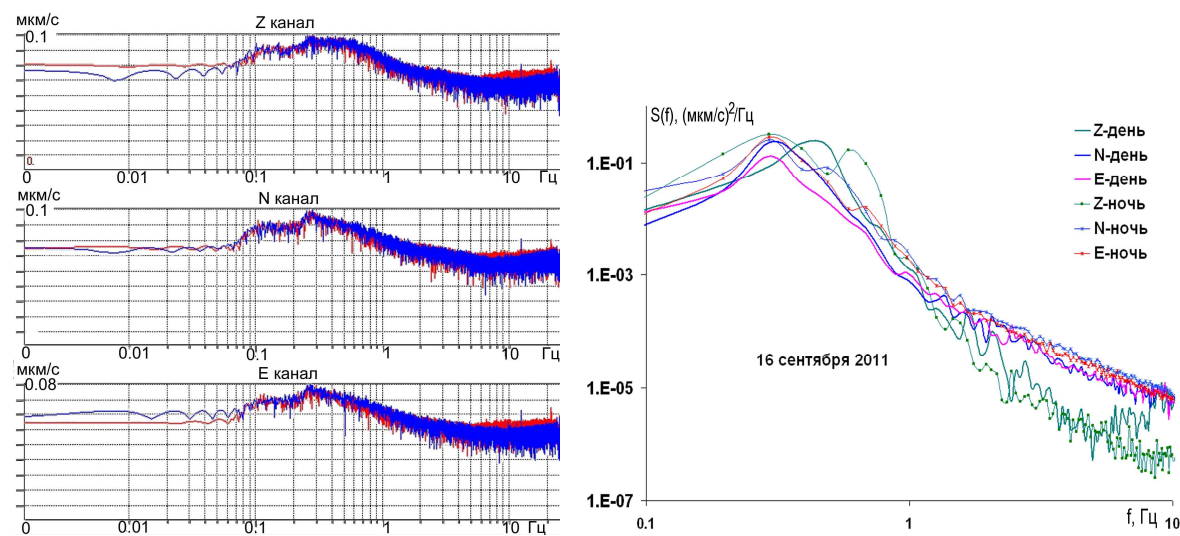


Рис. 1.9. Сравнение амплитудных спектров (слева) и спектров мощности (справа) микросейсмического фона для дня и ночи для середины сентября

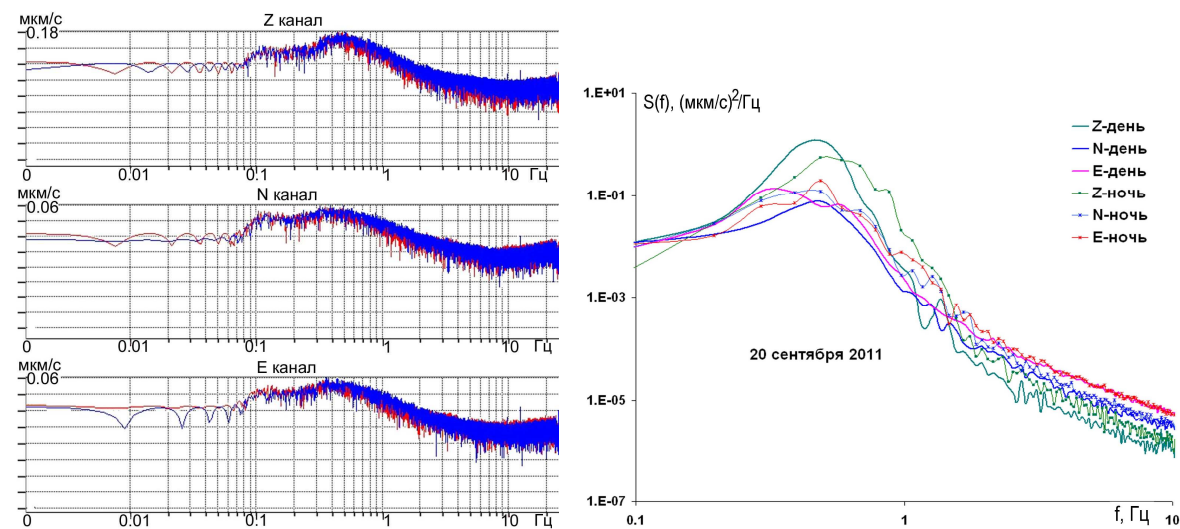


Рис. 1.10. Сравнение амплитудных спектров (слева) и спектров мощности (справа) микросейсмического фона для дня и ночи для конца сентября

Анализируя приведенные результаты, можно отметить, что в спокойную погоду уровень микросейсм по вертикальной  $Z$ -компоненте, характеризующий структуру квазипоперечных волновых структур, превышает уровни шума на горизонтальных  $N$  и  $E$  компонентах. Характер фона равномерный без резких всплесков. В штормовую погоду уровни микросейсм возрастают. Самое сильное изменение уровня наблюдалось в период с 07 по 11 октября 2011 г., когда интенсивность микросейсм возросла почти в 4 раза по сравнению с фоновыми значениями. Связано это было с существенным ухудшением метеоусловий в районе земли Франца - Иосифа.

## **2. Использование квазипоперечных сейсмогидроакустических волновых полей в прикладных задачах**

Итак, в предыдущем разделе было показано, что в определенном диапазоне частот возникают условия для существования особого типа сейсмогидроакустических (квазипоперечных) волн, распространяющихся в горизонтальном направлении (вдоль оси  $X$ ). При этом смещения частиц жидкости в квазипоперечной волне имеют преимущественно вертикальное направление. Другими словами, при распространении этого типа сейсмогидроакустических волн создается картина бегущей в жидкости "поперечной" волны. Эта волна переносит информацию вдоль оси  $X$  со скоростью  $c_i$ , которая заведомо больше скорости звука в жидкости  $c$  ( $c_i > c$ ).

Нет необходимости доказывать, что приведенные факты являются чрезвычайно важными как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Поясним физический смысл и причины существования квазипоперечной волны в жидкости, когда смещения в волне, бегущей в горизонтальном направлении (вдоль оси  $X$ ), имеют преимущественно вертикальный характер (на поверхности воды – точная "поперечность"). Этот кажущийся парадокс квазипоперечных волн в жидкости объясняется преимущественным влиянием на распространение сейсмогидроакустических волн упругого полупространства. Действительно, рассматриваемый случай соответствует малости квадратной скобки в знаменателе правой части выражения (1.7). Равенство нулю этой скобки означает уравнение для скорости волн Рэлея, распространяющихся на границе свободного упругого полупространства. Последнее обстоятельство полностью объясняет поперечность рассматриваемых волн в жидкости как результат воздействия рэлеевских волн большой длины ( $\lambda \gg H$ ). И хотя сама водная среда играет в данном случае почти "пассивную" роль, мало влияя на процесс переноса сейсмогидроакустической энергии, для широкого класса прикладных задач исследование характера колебательных процессов в жидкости, обусловленных наличием "квазипоперечных" сейсмогидроакустических волн, представляет несомненный интерес в силу указанных выше обстоятельств.

К сказанному можно добавить еще один факт, если обратиться к рис. 1.3, на котором для  $f= 1; 0,5; 0,1$  Гц представлены зависимости длины изучаемой волны от глубины моря. Анализируя приведенные данные, можно заметить, что в общем случае процесс распространения сейсмогидроакустической энергии в длинноволновой части зависит, в основном, от свойств упругого полупространства. Однако, вода при этом играет не до конца "пассивную" роль во всем диапазоне длин волн, определяя изменение длины бегущей волны в зависимости от глубины водного слоя для каждой заданной частоты. И только в пределе,

когда  $\frac{\lambda}{H} \rightarrow \infty$ ,  $H \rightarrow 0$  (мелкая вода), процесс полностью определяется и зависит от свойств упругого полупространства.

Анализируя полученные характерные особенности квазипоперечных волн, представляется возможным указать еще на одну особенность в свете последнего замечания, а именно: сейсмоакустическая волна может трансформироваться в сейсмогидроакустическую волну и наоборот. А это значит, что есть возможность как непрерывного выхода волнового процесса на сушу, так и "закачивания" волновой энергии в пределы морской или океанской акватории. Кроме того, возможен процесс распространения сейсмогидроакустических волн из одной замкнутой водной акватории в другую водную акваторию, в случае если эти акватории связаны одним общим упругим полупространством. В этом существенное отличие обнаруженных нами ранее сейсмогидроакустических волн от известных сейсмических и гидроакустических явлений в океане, которые обусловлены в основном высшими модами возбуждения волновода "поверхность моря - дно" или волновода, образованного известными типами неоднородностей, имеющими место в океане, которые широко освещены в литературе.

Здесь, по-видимому, следует указать, что в процессе проведения экспериментальных исследований векторных гидроакустических измерительных систем авторам удавалось наблюдать сигналы по  $Z$ -каналу от удаленных шумящих объектов (самолетов и кораблей). При этом горизонтальная компонента и давление в основном оказывались малыми. И только по мере приближения излучающего объекта к измерительной системе начинают поступать сигналы по горизонтальному каналу. В настоящее время эти результаты можно объяснить, основываясь на приведенных выше теоретических предположениях.

Кроме того, совершенно очевидно, что используя отличительную особенность рассматриваемого типа сейсмогидроакустических волн, связанную с характером изменения сигналов по  $X$ - и  $Z$ -каналам, представляется возможным указать и на способ определения дистанции до движущегося воздушного, надводного или подводного источника шума. Достаточно только принимать сигналы от этого источника при помощи трехкомпонентного векторного гидроакустического измерителя и сопоставлять их уровни, которые являются функцией дистанции и практически не зависят от изменяющихся физических характеристик водного слоя.

Проведенный выше теоретический анализ сейсмогидроакустических волн позволяет с новых позиций подойти к решению целого класса прикладных задач по обеспечению:

- связи с удаленными подводными объектами в сейсмогидроакустическом диапазоне частот;
- обнаружения шумящих образований в геологических структурах морского дна;
- мониторинга на нефть и газ перспективных месторождений на шельфе северных морей с использованием бортовых или автономных геолого-геофизических систем.

Так, например, обращаясь к задаче приема сейсмогидроакустического сигнала, можно заметить, что при больших длинах волн картина волнового процесса, которая практически постоянная по глубине, характеризуется большой вертикальной компонентой колебательной скорости. А это значит, что в качестве воспринимающего элемента здесь целесообразно использовать векторные гидроакустические приемные системы, имеющие максимальную избирательность по  $Z$ -каналу, т.к. любой воздушный, надводный или подводный источник

низкочастотного сейсмогидроакустического поля может быть обнаружен в длинноволновой области, когда для "почти" рэлеевского участка ( $\chi \ll 1$ ):

$$\begin{aligned} V_z &\approx \cos (\chi - kz) \Big|_{\chi \rightarrow 0} \rightarrow 1, \\ V_{x,y} &\approx \sin (\chi - kz) \Big|_{\chi \rightarrow 0} \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$0 < kz < \chi.$$

Выше было показано, что для некоторых типов неоднородных волн (например, боковых волн Л.М. Бреховских) сравнение величин  $V_z$  и  $V_{x,y}$  дает возможность однозначно определить дистанцию до источника шума. Примеры дальнейшего использования отмеченных выше особенностей, присущих сейсмогидроакустическим волнам, в прикладных задачах можно продолжить и расширить. Здесь же хотелось бы только отметить, что до настоящего времени вопросам, связанным с развитием сейсмогидроакустических процессов в океане, уделялось недостаточное внимание, по крайней мере, с точки зрения оценки роли и значения векторно-фазовых характеристик, генерируемых и трансформируемых акустических, сейсмогидроакустических, гидроакустических и сейсмоакустических волновых полей. В этой связи представляется возможным сформулировать несколько крупных фундаментальных проблем, требующих безотлагательного решения, а именно:

– проблему излучения, преобразования и передачи сейсмогидроакустических и сейсмоакустических колебаний в многослойных средах от различного типа источников (воздушные объекты, подводные и надводные объекты, специальные излучающие устройства и т.д.);

– проблему приема низкочастотной, сейсмоакустической и сейсмогидроакустической информации сосредоточенными и распределенными векторно-фазовыми измерительными системами автономного, бортового или скважинного (донного) типа;

– проблему изучения уровней мешающих воздействий (шумов) с целью создания методов краткосрочного и долгосрочного прогнозирования помеховой обстановки, обусловленной генерацией микросейсм, и развития методов локации как точечных, так и распределенных гидроакустических источников в сейсмогидроакустическом диапазоне частот.

## Выводы

Выполненные теоретические оценки показывают, что проблемы сейсмогидроакустики при их положительном разрешении должны сыграть важную роль в решении целого класса как фундаментальных, так и прикладных задач, направленных на совершенствование систем специальной связи, обнаружения и навигации. Эти проблемы по своему характеру лежат в пограничной области между сейсмическими и гидроакустическими явлениями.

## Литература

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Бреховских Л.М. - М.: Наука, 1957. – 502 с.

2. Собисевич А.Л. Мониторинг слоистых неоднородных сред / Собисевич А.Л. - М.: Объедин. Ин-т Физики Земли РАН, 2001. – 354 с.
3. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике / Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. - М.: Объедин. ин-т физики Земли РАН, 2001. - 297с.
4. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики и вулканологии / Собисевич А.Л. - М.: Ин-т физики Земли РАН, 2010. – 464 с.
5. Barstow N., Sutton G.H., Carter J.A. Particle motion and pressure relationships of ocean bottom noise: 3900 m depth; 0.003 to 5 Hz / Noël Barstow, George H. Sutton, Jerry A. Carter // GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS. – 1989. - VOL. 16, № 10. - PP. 1185-1188
6. Haubrich R.A., McCamy K. Microseisms: Coastal and pelagic sources / Richard A. Haubrich, Keith McCamy // REVIEWS OF GEOPHYSICS. – 1969. - VOL. 7, №3. - PP. 539-571

*Стаття надійшла до редакції 23 грудня 2011 р. російською мовою*

**© Л.Є. Собісевич, О.Л. Собісевич**  
**СЕЙСМОГІДРОАКУСТИЧНІ КВАЗІПОПЕРЕЧНІ ХВИЛІ**  
**В СИСТЕМІ «ЛІТОСФЕРА – ОКЕАН – АТМОСФЕРА»**

В статті викладена феноменологічна теорія квазіпоперечних хвильових полів, які виникають в системі «літосфера-океан-атмосфера». Вперше хвильові структури цього типу були виділені А.А. Баріхінім і Л.Є. Собісевичем в 60-ті роки минулого сторіччя при обробці даних експериментальних спостережень, пов'язаних з вивченням умов трансформації низькочастотних акустичних полів у складних геолого-гідрофізичних умовах, характерних для ряду прибережних районів Чорного моря.

**© Leonid E. Sobisevich, Alexey L. Sobisevich**  
**THE SEISMIC HYDRO ACOUSTIC QUASI-TRANSVERSE WAVES**  
**IN THE SYSTEM OF THE «LITHOSPHERE - OCEAN – ATMOSPHERE»**

In article presented phenomenological theory of quasi-transverse wave fields, which arise in the "lithosphere - ocean - atmosphere". The first wave the structure of this type have been allocated A.A. Barikhin and L.E. Sobisevich in the 60-s years of the last century in processing the experimental data observations related to the study of the conditions of transformation low-frequency acoustic fields in complicated geological and hydro - physical conditions, characteristic for a number of coastal areas of the Black sea.