Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т. 113

УДК 550.834.05

# ДИСТАНЦИОННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРВОГО СЛОЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А.И.СВЕЧНИКОВ

Рассмотрим систему признаковых характеристик волнового поля применительно к прогнозированию литологического состава донных отложений акустическим методом, исходя из механизма взаимодействия упругих волн на границе раздела и особенностей их распространения в осадке. Акустическое поле, возникающее в процессе взаимодействия импульса упругой волны с донными осадками, представляет собой временную функцию взаимодействия, которую можно описать с использованием дискретных отсчетов $y_{ji}$ с интервалами $\Delta t$, определяемыми теоремой Котельникова. Такое представление акустического поля полностью определяет его как непрерывную функцию (рис.I).

Структурный анализ временной функции взаимодействия позволяет рассматривать ее как совокупность отдельных эхо-сигналов, возникающих на акустических границах в толще осадка. В этом случае признаковое описание временной функции взаимодействия (акустической трассы) может быть получено в виде последовательности $X_{jnk}$ – признаковых характеристик для $n$ эхо-сигналов в $j$-м цикле измерения. Причем, в состав $k$ признаков эхо-сигнала входит также характеристика, определяющая положение эхо-сигнала на временной оси $t_{jn}$. Следовательно, $X_{jn1} = t_{jn}$. Признаковая

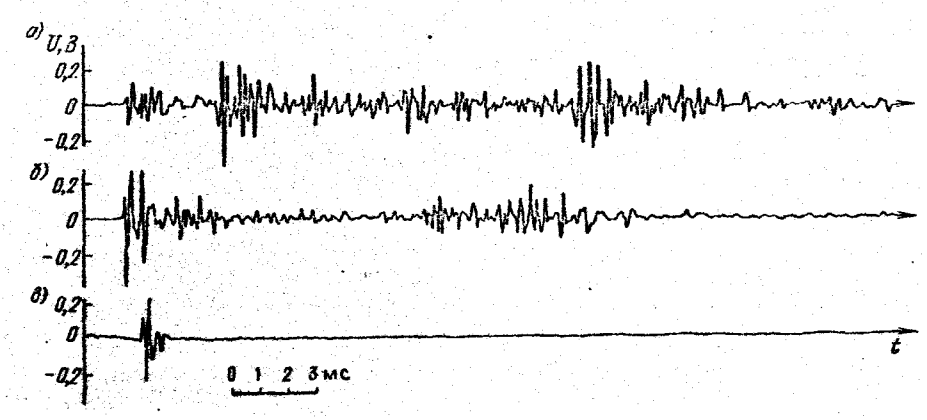



**Рис.1. Характер волнового поля, регистрируемого от донных отложений различного литологического состава (первый слой): а – илы; б – глины; в – песчано-гравийные отложения**

характеристика $X_{jn1}$ используется при изучении строения донных отложений. Величина $X_{jn1}$ может быть определена с использованием пороговых или корреляционных методов выделения эхо-сигнала.

В качестве наиболее общей признаковой характеристики регистрируемых эхо-сигналов может выступать амплитудное значение огибающей $A_{mjn}$. При изучении поведения этой характеристики удобно пользоваться нормированным амплитудным значением, причем нормирование следует выполнять по амплитудному значению зондирующего акустического импульса $A_{nj}$ с учетом геометрического расхождения фронта отраженной волны. Учитывая это, можем записать вторую признаковую характеристику эхо-сигнала для первого слоя донных осадков в виде

$$X_{j1,2} = A_{mj1}\, C(X_{j1,1}) / A_{nj}\, A(X_{j1,1}),$$

где $A(X_{j1,1})$ и $C(X_{j1,1})$ – коэффициенты, учитывающие затухание интенсивности зондирующего импульса, падающего на границу раздела, и отраженного эхо-сигнала, регистрируемого приемником от этой границы, соответственно.

Значения коэффициентов $A(X_{j1,1})$ и $C(X_{j1,1})$ зависят от геометрии фронта волны, генерируемого источником упругих колебаний, и от времени прихода эхо-сигнала в приемник. Численные значения этих коэффициентов для конкретного источника могут быть установлены экспериментально.

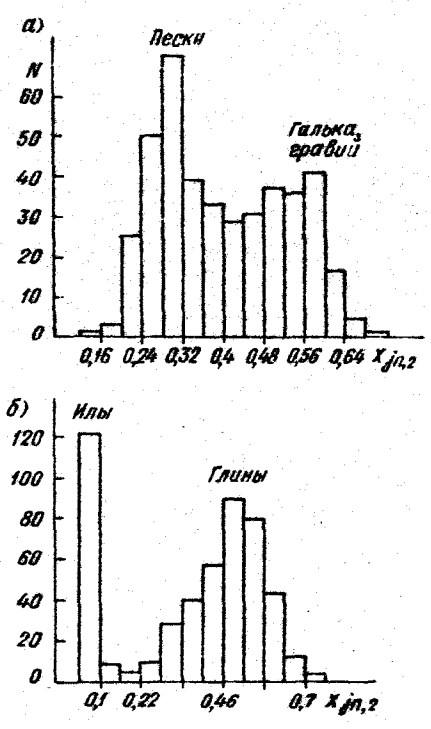



**Рис.2. Эмпирические распределения амплитудных значений донного эхо-сигнала: а – пески и гравийно-галечные отложения; б – илы и глины**

Поведение признака $X_{j1,2}$ изучено для четырех литологических типов донных отложений – илов, глин, песков и грубообломочных отложений (рис.2). Эмпирические распределения признака $X_{j1,2}$ получены при объеме выборки, равном 500.

Анализ представленных распределений показывает, что устойчивое разделение по этому признаку возможно только для иловых отложений. Эмпирические распределения для песков отличаются средними значениями $\bar{X}_{j1,2}$ от грубообломочных и глинистых отложений, хотя и пересекаются с ними, а средние значения распределений для глин и грубообломочных отложений достаточно близки ($\bar{X}_{j1,2} \approx 0{,}54$).

При выборе системы признаков, в первую очередь, необходимо учитывать связь последних с физическими

характеристиками распознаваемых объектов, их инвариантность при изменении условий приема, помехоустойчивость и простоту реализации.

Акустическим исследованиям на акватории часто мешают акустические шумы и ветровое волнение. Ветровое волнение существенно влияет на процесс акустических измерений, изменяя геометрические соотношения между приемо-излучающей системой и отражающей границей в каждом цикле измерений, что вызывает заметные флюктуации в амплитудных значениях регистрируемого эхо-сигнала $A_{mj,1}$ и времени его прихода в приемник.

Анализ поведения признака $X_{j1,1}$, измеряемого для плоской границы раздела, представленной мелкозернистыми песками, при ширине диаграммы направленности источника акустического излучения $\theta = 30^0$ и высоте волны на акватории около I м показал, что ветровое волнение вызывает появление высокочастотной составляющей в значениях $X_{j1,1}$ по профилю. Наблюдается довольно заметная взаимная корреляция между признаками $X_{j1,1}$ и $X_{j1,2}$, что хорошо согласуется с механизмом излучения направленным источником. Максимальные значения $X_{j1,2}$ соответствуют минимальным значениям признака $X_{j1,1}$, что характерно для случая нормального падения акустического луча на границу раздела.

Учет этого фактора позволил значительно повысить устойчивость признака $X_{j1,2}$, измеряемого по профилю для песчаных отложений и получить значения флюктуаций амплитуды эхо-сигнала, не превышающие IO %.

При прогнозировании литологического состава первого слоя донных отложений к числу диагностических признаков, которые необходимо учитывать, относятся структурные особенности изучаемой границы и ее шероховатость.

Физико-механические характеристики осадка (вязкость и текучесть) проявляются в структурных особенностях границы при формировании осадка. Для иловых отложений, которые представляют собой слабоуплотненные или полууплотненные осадки с большим содержанием жидкой фракции, характерна высокая подвижность, текучесть, что приводит к образованию плоских гладких границ раздела. Песчаные осадки, как и иловые, являются слабосвязанными отложениями, подверженными процессам переноса и переотложения, в результате которых также формируются практически плоские границы раздела со слабовыраженной кривизной. Глины – вязкие, пластичные, сильносвязанные осадки, что отражается в структурных особенностях границы. На поверхности глин обычно плавно сменяются положительные и отрицательные формы рельефа, что связано с появлением низкочастотной составляющей в признаке $X_{j1,1}$. Выходам коренных пород на поверхность дна присущи резкие и хаотичные изменения в характере границы, что вызывает возникновение высокочастотной составляющей в признаке $X_{j1,1}$ с широким частотным спектром и более высокими значениями амплитуды по сравнению с ветровым волнением.

Шероховатость границы проявляется в отраженном сигнале, в его структурных особенностях при соотношении длины волны зондирующего акустического импульса $\lambda$ и характерном размере неоднородности $a \geqslant \lambda/8$. Основные изменения в структуре эхо-сигнала, вызванные шероховатостью границы, заключаются в появлении дополнительных экстремумов в отраженном

сигнале, увеличении его длительности и в заметных флюктуациях его амплитудного значения $A_{mj,1}$.

Оценка степени шероховатости границы может быть выполнена с помощью признака $\bar{X}_{j1,3}$, учитывающего дисперсию амплитудного значения эхо-сигнала в процессе измерений и вычисляемого с учетом следующего соотношения

$$X_{j1,3} = (A_{mj,1} - \bar{A}_{mj,1}) / \bar{A}_{mj,1},$$

где $\bar{A}_{mj,1}$ – среднее значение амплитуды эхо-сигнала, регистрируемого от первого слоя донных осадков.

Измерения признака $X_{j1,3}$ для двух литологических типов донных осадков – мелкозернистых песков и грубообломочных отложений, представленных валунно-галечным материалом со средним размером обломков 5–15 см, были выполнены с помощью источника упругих колебаний с центральной частотой излучения 8 кГц. После обработки результатов этих измерений были получены численные оценки для признака $X_{j1,3}$ : для мелкозернистых песков и валунно-галечных отложений соответственно в среднем 9 и 27 %.

Изучение временных функций взаимодействия, полученных для донных отложений, в которых первый слой имеет различный литологический состав, показывает на возможность использования косвенных признаков волнового поля, которые могут характеризовать первый слой донных осадков. К числу таких характеристик изучаемой толщи донных осадков следует отнести «акустическую восприимчивость" разреза донных отложений, определяемую как энергетический отклик среды на возмущение. В основе принятой классификации донных отложений лежит средний размер частиц, слагающих осадок. Используя этот основной критерий классификации, можно разделить донные осадки на две большие группы: на осадки, имеющие средний размер частиц 1–2 мкм (илы и глины) и отложения, имеющие диаметр частиц 500 мкм и выше (пески, гравийные, галечные, валунные отложения). Для первой группы характерна тонкая слоистость осадка и наличие сильных упругих связей, для второй – отсутствие слоистости и весьма слабые упругие связи.

Наличие слабых упругих связей приводит к сильному затуханию и рассеянию энергии упругой волны в таких осадках в отличие от осадков с сильными упругими связями. Временная функция взаимодействия – функция отклика среды – для сильнорассеивающих разрезов донных осадков в основном представляется первым донным отражением, для слаборассеивающих разрезов временная функция взаимодействия – совокупность эхо-сигналов (см. рис.1).

Акустическую восприимчивость будем рассматривать как численную оценку отклика среды на возмущение импульсом упругой волны. Оценку акустической восприимчивости среды можно выполнить на основании признака

$$X_{j1,4} = \sum_{i=1}^{J} y_{ji} \Big/ \sum_{i=1}^{i_1} y_{ji},$$

где $i_1$ и $J$ – соответственно номер последней цифровой выборки в 1-м эхо-сигнале и номер последней выборки в трассе.

Анализ эмпирических распределений этого признака, полученных при объеме выборки $N$ = 500 для песчано-галечных, глинистых и иловых отложе-

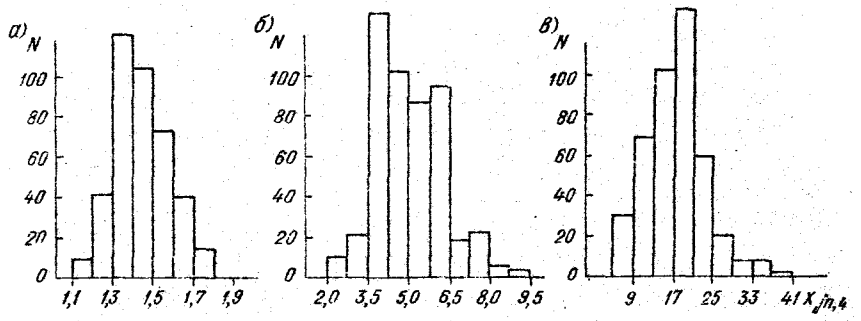



Рис.3. Интегральный признак: а - песчано-галечные отложения, б - глины, в - илы

ний, показывает, что с его помощью может быть получено устойчивое разделение донных осадков на три обособленных класса (рис.3). Представленные распределения получены в результате акустических измерений, выполненных с помощью электродинамического источника. С помощью признака $X_{j1,4}$ можно характеризовать акустическую прозрачность первого слоя донных отложений.

К числу сильнорассеивающих разрезов донных отложений относятся разрезы, в которых первый слой представлен газонасыщенными илами. В этом случае характер регистрируемой функции отклика практически не отличается от подобной функции для песчано-гравийных разрезов. Основное различие этих функций заключается в фазе донного эхо-сигнала. Донный эхо-сигнал, обусловленный изменением давления в отраженной волне, для газонасыщенных илов находится в противофазе с падающим импульсом упругой волны. В связи с этим возникает необходимость в анализе фазы первого эхо-сигнала, который можно выполнить с помощью признака $X_{j1,5} = sign\, b_1$, где $b_1$ - значение амплитуды первого вступления первого эхо-сигнала.

При изучении литологического состава донных отложений в качестве мешающего фактора может выступать донная растительность. Волновое поле, регистрируемое от участков дна акватории, покрытых донной растительностью, по своим характеристикам близко к волновому полю иловых отложений. Для устойчивого разделения участков акватории, покрытых растительностью, и областей развития иловых отложений необходимо использовать признак $X_{j1,1}$. Если иловые отложения обычно связаны с отрицательными формами рельефа, которые они заполняют, то растительность приурочена, как правило, к положительным формам рельефа и связана с песчаными и грубообломочными отложениями.

Рассмотренная система признаков отражает механизм взаимодействия импульса упругой волны с донными осадками различного литологического состава и может служить основой для создания системы распознавания или классификации объекта.

Наиболее простая система классификации может быть построена с использованием принципа «дихотомии" - последовательного разделения всего

множества классов на две противоположные группы. Это разделение выполняется при анализе конкретных признаков, поступающих в блок принятия решения, путем проверки фиксированных условий. Такой подход к построению системы классификации значительно снижает затраты на машинное время, необходимое на функционирование алгоритма распознавания, что весьма существенно при построении распознающих систем, работающих в реальном масштабе времени.

К числу основных процедур, выполняемых в процессе работы алгоритма классификации, относятся операции управления приемом акустической информации, обнаружения донного сигнала, вычисления амплитудных значений эхосигналов в регистрируемой трассе, вычисления и осреднения признаков (рис.4). В результате работы блока принятия решения формируется последовательность констант идентификации $L_k$.

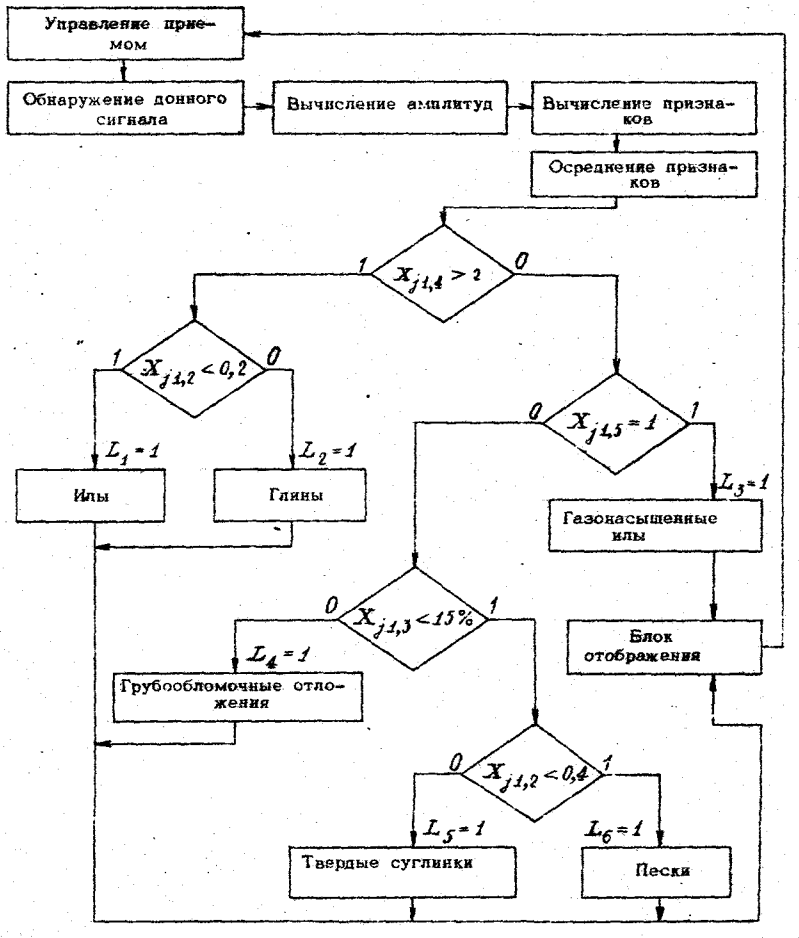



Рис.4. Алгоритм классификации

Блок принятия решения начинает свою работу с анализа признака $X_{j1,4}$. При $X_{j1,4} > 2$ классифицируемая граница относится к акустически мягким, слаборассеивающим разрезам, при $X_{j1,4} < 2$ изучаемый разрез считается сильнорассеивающим. Далее на основании анализа признака $X_{j1,2}$ принимается решение о принадлежности донной границы к классу илов ($L_1 = 1$), или к классу глин ($L_2 = 1$). Признак $X_{j1,5}$ позволяет выделить класс газонасыщенных илов. На основании значений признака $X_{j1,3}$, отражающего степень шероховатости границы, осуществляется выделение класса грубообломочных отложений, к которому следует также отнести и выходы коренных или скальных пород. Совместный анализ значений признаков $X_{j1,3}$ и $X_{j1,2}$ создает предпосылки для выделения класса песчаных осадков и твердых суглинков. Для уточнения выделяемых литологических классов донных отложений на этапе принятия решения необходимо также привлекать сведения о морфологических особенностях донной границы - признак $X_{j1,1}$.