

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 550.834.04

О НЕКОТОРЫХ ПЕРСПЕКТИВАХ УВЕЛИЧЕНИЯ ДЕТАЛЬНОСТИ
И ГЛУБИНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ГЛУБИННОГО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА МОРЕ

©1993г. С.Ю.Соколов

Геологический институт РАН, Москва

Поступила в редакцию 19.12.88 г. После доработки 03.03.92 г.

Рассмотрены перспективы увеличения глубинности метода ГСЗ на море путем применения накопления слабых сигналов от пневмоисточников, и детальности при помощи более оптимальных условий суперпозиции сигналов в группе пневмоисточников разного объема в частотном диапазоне ГСЗ. Оценены количественно факторы, определяющие условия экспериментов по предлагаемой схеме. Указаны условия реализации обсуждаемых рекомендаций.

Метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) является одним из наиболее информативных методов исследования строения земной коры и верхней мантии в морских регионах. Эта информативность обеспечивается регистрацией глубинных преломленных и закритических отраженных волн на удалениях от десятков до сотен километров от мощного источника сейсмических колебаний. До конца 60-х годов в качестве источника использовали взрывы зарядов взрывчатых веществ, от которых на выходе из исследуемой среды регистрируются сигналы с частотой 3 - 10 Гц [3, 4, 6]. Методика работ была хорошо отлажена, и учеными был собран обширный материал о строении земной коры под океаном. Однако эти данные имеют два недостатка [3]: недостаточно высокую частоту сигналов, из-за которой в зоне интерференции волн удавалось использовать для интерпретации в основном только первые вступления, и низкую плотность излучений, которая делает вероятным пропуск коротких участков годографов. Несмотря на отмеченные недостатки, применение мощных взрывов позволяло успешно зондировать литосферу. В конце 60-х годов в связи с губительным действием взрывов на морскую фауну в практику работ ГСЗ на море стали внедряться невзрывные, в частности, пневматические источники сейсмических волн (ПИ) [6]. По сравнению со взрывами ПИ имеют ряд преимуществ: большую безопасность в эксплуатации, хорошую повторяемость импульса, возможность контролировать и частично управлять характеристиками импульсов, большую плотность данных, лучший КПД в сейсмическом диапазоне частот. Однако из-за малой мощности ПИ по сравнению со взрывами оказалось практически невозможно осуществлять зондирования литосферы на всю ее глубину, и в большинстве случаев глубинность исследований ограничена границей Мохоровичича. Тем не ме-

нее благодаря упомянутым качествам за последние 20 лет при использовании ПИ получены более детальные данные о строении земной коры [1,3,6].

В настоящее время ГСЗ на море решает две важные задачи: изучение строения верхней мантии и тонкой структуры основных слоев земной коры [3]. Решение первой задачи затруднено ограничением глубинности, а решение второй - недостаточной разрешающей способностью зондирующих сигналов. Возможным способом увеличения глубинности и детальности метода ГСЗ на море с использованием ПИ в качестве источника сейсмических волн посвящена данная статья.

Эксперименты по накоплению слабых сейсмических сигналов в морских условиях. Для увеличения глубинности метода ГСЗ необходимо выделять слабые сигналы от ПИ на больших расстояниях (сотни километров), соответствующих выходу на поверхность волн от границ в верхней мантии. Одним из способов выделения слабых сигналов от ПИ на фоне помех является их накопление. Оно хорошо изучено теоретически, но любое практическое применение всегда сопряжено со специфическими трудностями. Для апробации накопления при ГСЗ на море Институтом океанологии РАН был поставлен ряд экспериментов. В первом эксперименте [7] проводили накопление сигналов от ПИ-1Б, излучаемых с судна на якорь, и регистрацию донным сейсмографом на расстоянии около 15 км. Было показано, что при вариациях длины пробега волны от источника до приемника накопление перестает быть эффективным и увеличения отношения сигнал/помеха (С/П) не происходит. Вариации длины пробега связаны с пространственными перемещениями судна из-за ветра и течения, которые не удалось измерить с точностью не хуже четверти длины волны основной частоты излучения ПИ и учесть при суммировании единичных трасс. Исходя из

этого, следующий эксперимент по накоплению [8] был проведен в условиях фиксированного положения источника и приемников. Накопление проводили в условиях сильного шума на удаленных до 120 км. В результате эксперимента была успешно опробована методика накопления при ГСЗ и отлажена обработка данных с учетом специфических поправок. Оценки отношения С/П на единичных трассах в конкретных условиях эксперимента дают значения от 0.5 на минимальном до 0.05 на максимальном удалении от источника. Внедрению опробованной методики в практику работ ГСЗ на море препятствовала низкая точность навигационных систем, которые до недавнего времени использовали на научных судах. Для детального учета дрейфа судна ошибка определения текущих координат должна составлять не более 25% от четверти длины волны, и наблюдения должны проводиться при каждом излучении сейсмического сигнала. Применение навигационной системы Global Position System, обладающей точностью 15 - 20 м, откроет новые возможности для постановки экспериментов ГСЗ в рабочем диапазоне регистрируемых частот до 10 Гц с использованием методики накопления сигналов от ПИ в открытом океане.

Оценка числа реализаций сигнала, необходимого для выделения слабых глубинных волн накоплением. Для планирования экспериментов по накоплению необходимо иметь оценку числа единичных реализаций используемого источника, которые надо просуммировать, чтобы выделить сигнал на нужном удалении. Для этого воспользуемся методикой получения подобной оценки, предложенной в работе [11], но применим ее к морским типам источников, данным по амплитуде сейсмических сигналов в океане и уровню донных микросейсм. Оценка осуществляется для амплитуд вертикальной компоненты скорости смещения и давления. На рис. 1 приведены взятые из литературы экспериментальные данные об амплитудах глубинных волн, использовавшихся для интерпретации и полученных на различных структурах океанов и морей. Кривая 1 соответствует полосе амплитуд для частоты 4 Гц от заряда тротила 135 кг [3]. Кривая 2 соответствует полосе амплитуд для частоты 6 Гц от заряда тротила 25 кг [1,6]. Условия интерференции с границей вода/воздух в обоих случаях оптимальны. Обе кривые приведены до удалений 150 км и пересчитаны в единицы давления и скорости смещения с учетом частоты. До удаления 300 км кривые экстраполированы по закону $1/R$. Правомерность подобной экстраполяции следует из анализа данных, приводимых в [4]. Далее необходимо пересчитать амплитуды кривых 1 и 2 к мощности, частоте и условиям возбуждения источника ПИ-5, так как он является базовым излучателем при работах ГСЗ на море, проводимых Институтом океанологии РАН. Основой для подобного пере-

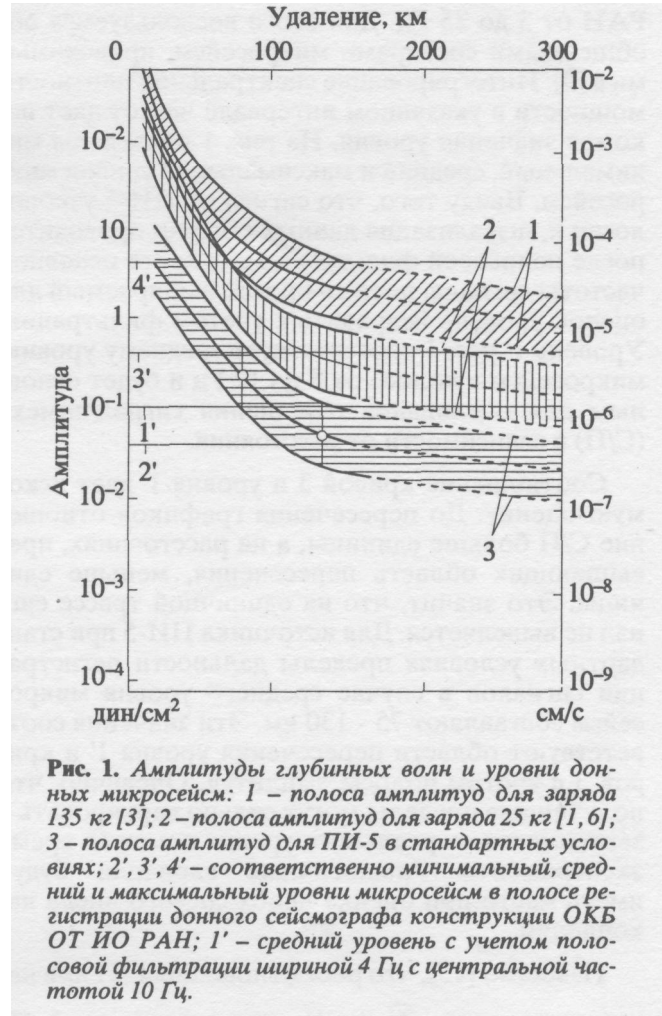


Рис. 1. Амплитуды глубинных волн и уровни донных микросейсм: 1 – полоса амплитуд для заряда 135 кг [3]; 2 – полоса амплитуд для заряда 25 кг [1, 6]; 3 – полоса амплитуд для ПИ-5 в стандартных условиях; 2', 3', 4' – соответственно минимальный, средний и максимальный уровни микросейсм в полосе регистрации донного сейсмографа конструкции ОКБ ОТ ИО РАН; 1' – средний уровень с учетом полосовой фильтрации шириной 4 Гц с центральной частотой 10 Гц.

счета служит тот факт, что ПИ-5 по излучению в сейсмическом диапазоне частот приблизительно равен заряду тротила 1 кг [2]. Пересчет был осуществлен независимо об обеих кривых. Для этого использовали пропорциональность амплитуды сигнала корню кубическому из веса заряда [5]. Источник ПИ-5 с объемом рабочей камеры 30 л при давлении воздуха в камере 100 атм. на глубине буксировки 15 м возбуждает сигнал с основной частотой около 10 Гц. При фиксированном значении энергии колебания увеличение частоты в AT раз сопровождается падением амплитуды в K раз, что также было учтено при пересчете. Кривые 1 и 2 были получены в оптимальных условиях по интерференции с границей вода/воздух. Для источника ПИ-5 в стандартных условиях работы этот оптимум не соблюдается, что приводит к введению поправки амплитуды, вычисляемой по формуле $\sin(Wh/V)$. В результате всех пересчетов мы получаем кривую 3, отвечающую источнику ПИ-5 в стандартных условиях работы методом ГСЗ в океане.

Рассмотрим теперь уровни донных микросейсм, соответствующие полосе регистрации донного сейсмографа конструкции ОКБ ОТ ИО

РАН от 3 до 25 Гц. Для этого воспользуемся обобщенными спектрами микросейсм, приводимыми в [9]. Интегрирование спектральной плотности мощности в указанном интервале частот дает искомое значение уровня. На рис. 1 приведены минимальный, средний и максимальный уровни микросейсм. Ввиду того, что сигнал от ПИ-5 узкополосен и визуализация данных обычно проводится после полосовой фильтрации в области основной частоты сигнала, целесообразно выбираемый для оценок уровень исправить с учетом фильтрации. ^Уровень Γ рис. 1 соответствует среднему уровню микросейсм в полосе от 8 до 12 Гц и будет основным для оценивания отношения сигнал/помеха (С/П) в зависимости от расстояния.

Соотношение кривой 3 и уровня Γ дает искомую оценку. До пересечения графиков отношение С/П больше единицы, а на расстояниях, превышающих область пересечения, меньше единицы. Это значит, что на единичной трассе сигнал не выделяется. Для источника ПИ-5 при стандартных условиях пределы дальности регистрации сигналов в случае среднего уровня микросейсм составляют 75-130 км. Эти значения соответствуют области пересечения уровня Γ и кривой 3 с учетом полосы амплитуд. Очевидно, что полученные пределы могут сильно варьировать в зависимости от реального уровня помех во время эксперимента. Аналогичные вариации будут иметь место при оценке необходимого числа накоплений.

Известно [13], что рост отношения С/П при накоплении равен \sqrt{N} , где N - число реализаций. Из этого следует, что для получения оценки минимального необходимого для накопления сигнала числа реализаций нужно возвести в квадрат отношение помеха/сигнал. Например, для выделения сигналов от ПИ-5 на удалении 300 км на фоне среднего уровня микросейсм необходимо накопить от 4 до 100 реализаций. Этот разброс является следствием наличия полосы амплитуд. Для среднего значения кривой 3 мы получим число реализаций, равное 25. Эти оценки сделаны для случая, когда отношение С/П от малых значений увеличивается до единицы, поэтому мы говорим, что это минимальное необходимое число реализаций. Кроме того, при суммировании единичных воздействий может иметь место разброс времен вступлений полезной части записи, который снижает эффективность накопления. Влияние этого разброса может быть оценено при помощи энергетической характеристики некогерентного суммирования, приводимой в работе [10], и выражено в виде дополнения к необходимому числу реализаций для накопления.

Таким образом, изложенная схема позволяет получать искомые оценки для морских источников сейсмических волн при наличии информации

о мощности, частоте и условиях возбуждения путем пересчета амплитудных графиков рис. 1. Необходимо отметить, что при пересчете базовой кривой 3 к ПИ меньшего объема с частотами пульсаций, превышающими 15-20 Гц, нужно в подобных расчетах учитывать влияние частотно-зависимого затухания, которое на этих частотах достаточно велико [3]. Точная информация об уровне микросейсм во время эксперимента сможет уменьшить разброс оценок числа реализаций, необходимых для накопления.

Формирование широкополосных зондирующих импульсов для увеличения детальности метода ГСЗ. Рассмотрим теперь один из возможных способов "увеличения детальности метода ГСЗ на море. Для этого необходимо формировать более мощные и широкополосные в диапазоне частот ГСЗ импульсы. Решение этой задачи можно осуществить группированием ПИ. В сейсморазведке МОВ как в нашей стране, так и за рубежом широко используются различные методы группирования ПИ [12]. Смысл практически всех этих методов сводится к подавлению повторных ударов мощной и узкополосной пульсации воздушного пузыря и к выделению первого ударного максимума. Одним из наиболее распространенных способов реализации этого принципа является суперпозиция сигналов от ПИ разного объема с набором различных частот пульсации при синхронизации ПИ по первому максимуму. Это дает относительное подавление повторных ударов за счет их несинфазного суммирования в выходном импульсе. Для целей ГСЗ, по-видимому, все надо делать наоборот. Для пояснения этой мысли рассмотрим рис. 2. На нем представлена типичная форма импульса от ПИ, полученная при регистрации на глубоко расположенный гидрофон без фильтрации (а) и после низкочастотной фильтрации (б), моделирующей воздействие среды на импульс. Заметно, что импульс приобрел форму отрезка синусоиды с частотой пульсации и плавной несимметричной огибающей. Главным является то, что максимальная амплитуда сигнала на данной частоте приходится не на первый, а на повторный удар. Это наводит на мысль, что для получения мощного и широкополосного в диапазоне частот

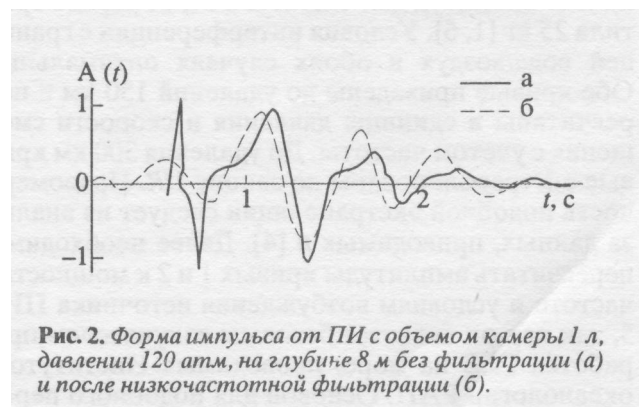


Рис. 2. Форма импульса от ПИ с объемом камеры 1 л, давлением 120 атм, на глубине 8 м без фильтрации (а) и после низкочастотной фильтрации (б).

ГСЗ импульса от группы ПИ необходимо осуществлять синхронизацию источников по Повторным ударам, т.е. вводить в моменты срабатывания ПИ с меньшими периодами пульсаций такие задержки, чтобы повторные удары всех ПИ осуществлялись одновременно. При этом набор частот пульсаций в группе целесообразно выбирать так, чтобы он более или менее равномерно заполнял выбранный рабочий диапазон. Приведем пример численного моделирования данного способа формирования суммарного импульса от группы ПИ. Моделирование проводили при помощи одиночных экспериментальных записей сигналов от ПИ малых объемов, полученных сотрудниками Института физики Земли РАН совместно с Горьковским политехническим институтом в 1979 г. во 2-м рейсе ГС "Иван Киреев". Отметим, что закономерности суперпозиции не меняются при изменении временного масштаба. На рис. 3а-г представлены записи сигналов от ПИ с объемами камер соответственно 1; 0.5; 0.3; 0.15 л, полученные рейфе с помощью гидрофона на глубине 100 м. На рис. 3д показаны результаты суммирования сигналов от двух камер по 0.5 л, двух камер по 0.15 л, от камер 1 и 0.3 л, обработанных низкочастотным фильтром, с задержками, рассчитанными по формуле:

$$\tau_i = T_{\max} - T_i, \quad (1)$$

где T_i - период пульсации ПИ; T_{\max} - максимальный период пульсации ПИ в группе; τ_i - задержка. На рис. 3е представлен амплитудный спектр результата суммирования. Полученная спектральная характеристика более или менее равномерна в диапазоне частот пульсаций использованных сигналов и не имеет глубоких минимумов. Импульс, соответствующий этой характеристике, приближается к нульфазному, удобен для интерпретации данных и обладает хорошей разрешающей способностью для выбранного диапазона частот пульсаций. Эффективная длительность импульса равна приблизительно 0.05 с при эффективной активной полосе около 30 Гц. Амплитудная отдача ПИ, входящих в группу, в суммарном импульсе будет максимальной, так как суммирование проводится при синхронизации моментов с наибольшей пиковой мощностью на частоте пульсаций.

В заключение необходимо отметить, что для реализации изложенных путей увеличения глубинности и детальности метода ГСЗ на море нужно следующее: судовые навигационные системы с точностью определения координат порядка первых десятков метров и лучше и гибкие системы управления и контроля работы группы ПИ с возможностью менять в больших пределах задержки и периоды пульсации каждого излучающего элемента группы. Применение новых технических средств и постановка специальных экспериментов по совершенствованию методики морских работ даст возможность практически

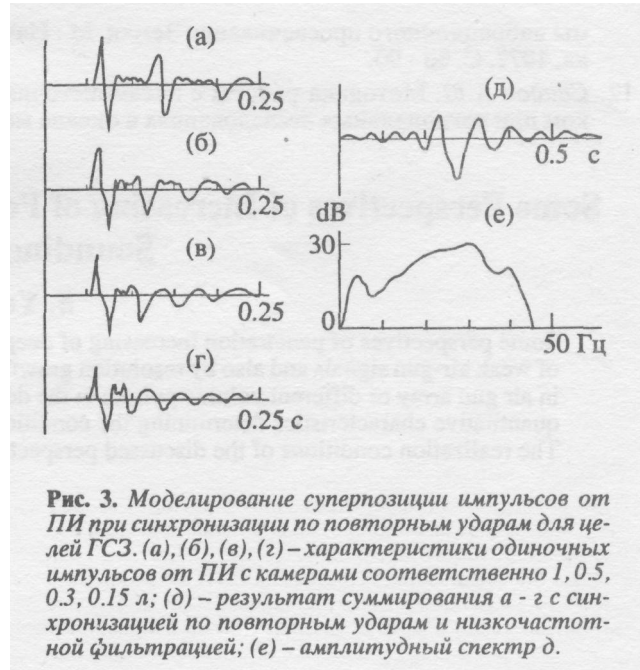


Рис. 3. Моделирование суперпозиции импульсов от ПИ при синхронизации по повторным ударам для целей ГСЗ. (а), (б), (в), (г) - характеристики одиночных импульсов от ПИ с камерами соответственно 1, 0.5, 0.3, 0.15 л; (д) - результат суммирования а - г с синхронизацией по повторным ударам и низкочастотной фильтрацией; (е) - амплитудный спектр д.

оценить эффективность предложенных рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геофизика океана. Т. 1. М.: Наука, 1979. 472 с.
2. Ельников ИМ., Непрочное Ю.П. Применение пневматических источников при глубинном сейсмическом зондировании на море // Проблемы вибрационного просвечивания земли. М.: Наука, 1977. С. 185-195.
3. Зверев СМ., Капустин Н.К. Сейсмические исследования литосферы Тихого океана. М.: Наука, 1980. 208 с.
4. Косминская И.П. Метод глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхов мантии. М.: Наука, 1968. 228 с.
5. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. 495 с.
6. Непрочное Ю.П. Сейсмические исследования в океане. М.: Наука, 1976. 180 с.
7. Непрочное Ю.П., Седов В.В., Гринько Б.Н. Опыт накопления сигналов от пневмоисточника при ГСЗ на море // Океанология. 1979. Т. 19. № 3. С. 499 - 504.
8. Непрочное Ю.П., Седов В.В., Островский А.А., Соколов С.Ю. Результаты экспериментов по накоплению сейсмических сигналов от стационарного пневмоизлучателя на юго-западном побережье Каспийского моря // Океанология. 1985. Т. 25. № 2. С. 319-324.
9. Островский А.А. Обобщенные спектры донного сейсмического шума мирового океана // Океанология. 1982. Т. 22. № 6. С. 980 - 983.
10. Ранопорт М.Б. Автоматическая обработка записей колебаний в сейсморазведке. М.: Недра, 1973. 1% с.
11. Рябой В.З., Шнеерсон М.Б. Абсолютные уровни сигналов и невзрывные источники колебаний при глубинных сейсмических исследованиях // Пробле-

- мы вибрационного просвечивания Земли. М.: Наука, 1977. С. 86 - 90.
12. Саидов А.Ю. Методика работы с пневмоисточником при региональных исследованиях в океане методом НСП. М., 1984. 13 с. - Деп. в ВИНТИ 17.08.84, № 1853-84.
13. Харкевич А.Л. Борьба с помехами. М.: Изд. Физ.-мат. лит-ры, 1963. 220 с.

Some Perspectives of Increasing of Penetration and Resolution in Deep Seismic Sounding of the Ocean

S. Yu. Sokolov

Some perspectives of penetration increasing of deep seismic sounding in the ocean by using the accumulation of weak air-gun signals and also by resolution growth due to the optimization of signal superposition conditions in air gun array of different volume pulsers in the deep seismic sounding frequency domain are discussed. The quantitative characteristics determining the conditions of experiment for the suggested scheme are estimated. The realization conditions of the discussed perspectives are given.