

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
Всесоюзный научно-исследовательский, проектно-конструкторский
и технологический институт геологических, геофизических
и геохимических информационных систем
(ВНИИГеоинформсистем)

На правах рукописи

УДК 550.834.04+550.34.04

СОКОЛОВ Сергей Юрьевич

НАКОПЛЕНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ДЛЯ ГСЗ НА МОРЕ

Специальность 04.00.22 - Геофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 1990

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени Геологическом институте АН СССР.

- Научный руководитель — доктор физико-математических наук НЕПРОЧНОВ Ю.П. (Институт океанологии АН СССР, Москва)
- Официальные оппоненты — доктор физико-математических наук ЗВЕРЕВ С.М. (Институт физики Земли АН СССР, Москва),
кандидат физико-математических наук С.Л.ЛОПАТНИКОВ (ВНИИ Геоинформсистем, Москва)
- Ведущая организация — Всесоюзный научно-исследовательский институт геофизических методов разведки (ВНИИ Геофизика, Москва)

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1990 г. в ____ час. на заседании Специализированного совета Д.071.10.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Всесоюзном научно-исследовательском проектно-конструкторском и технологическом институте геологических, геофизических и геохимических информационных систем по адресу: ПЗ105, Москва, Варшавское шоссе, д.8, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в геологическом фонде ВНИИ Геоинформсистем.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1990 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
доктор геолого-минералогических наук *С.С.Смирнов* В.С.Лебедев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) на море, наряду с МОВ ОГТ, является одним из самых информативных методов исследования строения земной коры и верхней мантии. Эта информативность обеспечивается регистрацией глубинных преломленных и закритических отраженных волн на удалениях от десятков до сотен километров от мощного источника колебаний. До конца 60-х годов в качестве источника использовались взрывы мощных зарядов бризантных взрывчатых веществ, которые формируют на выходе из исследуемой среды низкочастотные (3-10 Гц) импульсы. Методика работ была хорошо отлажена и учеными был собран обширный материал о строении земной коры океана. Но эти данные имеют два недостатка:

1. Невозможность уверенного выделения отдельных волн в интерференционном поле из-за низкой частоты сигналов, что во многих случаях ограничивает интерпретацию определением первых вступлений.

2. Низкая плотность излучений, которая делает вероятным пропуск волн, выходящих первыми между трассами.

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). По сравнению со взрывами ПИ имеют следующие преимущества: 1) безопасность в эксплуатации; 2) хорошая повторяемость импульсов, необходимая для цифровой обработки; 3) возможность контролировать форму импульса; 4) управление некоторыми характеристиками импульса; 5) повышение плотности данных по сравнению со взрывами, делающее прослеживание волновых фаз более

уверенным; 6) более высокие частоты пульсаций газового пузыря в воде; 7) более высокий КПД в сейсмическом диапазоне частот. Но из-за малой мощности ПИ по сравнению со взрывами появляется один недостаток - ограничение дальности регистрации волн приблизительно до 100 км, что ограничивает глубинность исследований границей Мохоровичича.

В настоящее время перед морским ГСЗ стоят две важные задачи: 1 - изучение расслоенности верхней мантии, 2 - изучение тонкой структуры основных слоев коры. При использовании ПИ для возбуждения сейсмических сигналов решению первой задачи мешает ограничение дальности регистрации волн. Для увеличения глубинности исследований необходимо регистрировать на больших удалениях слабые сигналы от ПИ при отношении сигнал/помеха (С/П) много меньше 1.

Одним из способов, который можно применить для этого в ГСЗ, является накопление. Теоретически накопление сигналов изучено достаточно полно, но так как любая практическая реализация всегда сопряжена со специфическими трудностями, то целесообразно поставить задачу экспериментального исследования возможности накопления сигналов от ПИ в ГСЗ при малом отношении С/П и наличии некогерентности суммируемых воздействий.

Для успешного решения второй задачи - исследования тонкой структуры слоев - необходимо увеличение временной разрешающей способности сигналов от ПИ, которое можно получить, сформировав мощные и широкополосные сигналы в рабочем диапазоне частот ГСЗ от 3 до 25 Гц при помощи группирования одиночных ПИ с разными характеристиками. При соответствующем подборе этих характеристик суммарный сигнал от группы будет иметь определенные желаемые свойства. Для работ ГСЗ представляется целесообразным осуществить подбор оптимальных параметров группы ПИ, ориентированной

на выделение частот пульсаций. Численное моделирование суммарного импульса от группы ПИ при вариации параметров отдельных излучателей позволит приблизить характеристики суммарного импульса к желаемым и выработать соответствующие рекомендации. Отдельным аспектам упомянутых проблем, решение которых должно увеличить глубинность и детальность ГСЗ на море, посвящена предлагаемая работа.

Цель работы. Экспериментальное и численное изучение волновых полей, возбуждаемых ПИ, с целью расширения физических возможностей метода ГСЗ на море (глубинности и детальности) путем увеличения диапазона амплитуд выделяемых сигналов и их частот.

Основные задачи.

1. Определение эффективности методики накопления слабых сейсмических сигналов при ГСЗ от пневмоисточников на больших удалениях при отношении сигнал/помеха много меньшем 1 (примерно до 0,1) при наличии некогерентности единичных суммируемых воздействий.

2. Численное изучение возможности создания мощных и широкополосных импульсов для ГСЗ на море при помощи пневмоизлучателей, эффективно использующих энергию сжатого воздуха, и выделения их на фоне помех.

Методы решения поставленных задач. Постановка экспериментальных полевых работ в условиях минимума некогерентности единичных трасс с последующей обработкой данных на ЭВМ и численное моделирование сигналов от групповых ПИ при помощи одиночных экспериментальных записей.

Научная новизна. Автором впервые:

- экспериментально показана возможность исследования глубоких зон литосферы методом ГСЗ с применением методики накопления

слабых сигналов от пневмоисточников;

- показана принципиальная возможность повышения детальности метода ГСЗ за счет формирования составных сигналов от пневмоисточников разного объема и последовательного частичного выхлопа воздуха одиночного пневмоисточника.

Указанные положения выносятся на защиту.

Практическая ценность. Проведенные экспериментальные и численные исследования продемонстрировали принципиальную возможность выделения слабых сейсмических сигналов на фоне шума накоплением на удалении в первые сотни километров от ПИ и возможность получения геофизической информации по опробованной методике. Обоснованы требования к аппаратуре и методике, необходимой для накопления слабых сигналов в условиях океана. Приведена схема получения оценки дальности регистрации и числа реализаций, необходимых для накопления сигнала на нужном удалении с фиксированным уровнем шума для произвольного морского сейсмического источника. Даны рекомендации по формированию групп пневмоисточников: ориентированных на выделение низкочастотных пульсаций в спектре излучения ПИ для метода ГСЗ в океане. Проанализирована сфера применимости рассмотренных способов формирования сигналов. Качественно оценена сравнительная эффективность различных математических методов выделения сигналов на фоне помех в широком диапазоне значений отношения С/П, поставленных в соответствие реальным дальностям регистрации.

Используемые материалы. Экспериментальные материалы по накоплению сигналов от пневмоизлучателя были получены коллективом сотрудников Института океанологии АН СССР при активном участии автора, в 1980-1981 гг. во время работ Каспийской экспедиции при технической поддержке Азербайджанского отделения ВНИИГео-

физики. Экспериментальные характеристики одиночных источников были получены сотрудниками Института физики Земли АН СССР совместно с Горьковским политехническим институтом в 1979 г. во 2-ом рейсе ГС "Иван Киреев", обработаны автором и использованы в численном моделировании групповых источников. При обработке данных экспериментов и численном моделировании автором широко использовались возможности современных ЭВМ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научном семинаре лаборатории 901 ИФЗ АН СССР (Москва, 1985), на Всесоюзном совещании по техническим средствам и методам изучения океанов и морей (Геленджик, 1985), на 3-й Всесоюзной конференции молодых ученых "Актуальные проблемы геофизики" (Суздаль, 1986), на отраслевой конференции молодых специалистов ВНИИЯГ и ВНИИГеофизики (Москва, 1986), на научном семинаре отдела 14 сейсморазведки ВНИИГеофизики (Москва, 1986), на семинаре кафедры сейсмологии и геоакустики Геологического факультета МГУ (Москва, 1986), на семинаре лаборатории сейсмических исследований ИО АН СССР (Москва, 1986), на ежегодных конкурсных чтениях ГИН АН СССР (Москва, 1986, 1988), на совместном научном семинаре отделов 800 и 900 ИФЗ АН СССР (Москва, 1988), на семинаре лаборатории 1 ВНИИГеоинформсистем (Москва, 1988).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы и получено авторское свидетельство.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит страниц машинописного текста, 26 рисунков и список литературы из 91 наименования.

Работа выполнена в лаборатории морской геоморфологии и тектоники дна океана Геологического института АН СССР. Заочная аспирантура закончена в Институте океанологии АН СССР.

Основные экспериментальные результаты получены автором лично и совместно с к.ф.-м.н. В.В.Седовым и к.ф.-м.н. А.А.Островским. Автор искренне благодарен за помощь в постановке задач и интерпретации результатов.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Ю.П.Непрочнову за постановку задач и постоянную поддержку. Ценные замечания были высказаны Б.М.Шубиком, В.В.Калининым, И.А.Бересневым и Н.К.Капустян, за которые автор глубоко признателен. Особую благодарность автор хочет выразить коллективам лаборатории сейсмических исследований Института океанологии АН СССР и лаборатории морской геоморфологии и тектоники дна океана Геологического института АН СССР, где прошли первые шаги самостоятельной работы и первые экспедиции. Автор также благодарен всем, кто проявил интерес к результатам работы и предоставил возможность их применения в практике экспедиционных работ в будущем.

ГЛАВА I посвящена рассмотрению актуальности и состоянию проблем накопления слабых сигналов и численного моделирования составных импульсов для метода ГСЗ на море при использовании невзрывных источников. Даны оценки отношения C/P и числа накоплений, необходимого для выделения слабых мантийных волн от ПИ.

В п.1.1. дан краткий исторический обзор развития ГСЗ на море. Отмечено, что сложившийся к 60-м годам аппаратно-методический комплекс с использованием взрывов в качестве источников колебаний дал исследователям возможность собрать обширные данные о строении литосферы Мирового океана. На основании этих данных возникла 3-слойная модель океанической коры и утвердилось представление о расслоенности верхней мантии. Пневматические

источники, почти целиком вытеснившие взрывы из практики морских работ, позволяют получать более детальные данные с лучшим разрешением, но обладают малой мощностью по сравнению со взрывами. Это обеспечивает построение по сейсмическим данным более сложных моделей земной коры. При этом остаются проблемы, решение которых лежит вне физических возможностей ГСЗ с ПИ (глубинности и детальности). Расширить эти возможности позволит реализация импульсного накопления в ГСЗ и создание мощных и широкополосных групповых ПИ, что, соответственно, увеличит глубинность и детальность исследований.

П.1.2. посвящен оценке отношения C/P для глубинных волн, возбуждаемых ПИ в условиях океана. Эти оценки необходимы при планировании работ по накоплению, так как они дают примерное число реализаций отклика среды, которое надо зарегистрировать для выделения слабого сигнала на фоне шума на конкретном удалении. Оценки были получены по известной методике (Рябой В.З., Шнеерсон М.Б.) при помощи литературных данных (Ю.П.Непрочнов, С.М.Зверев, А.В.Николаев, И.П.Косминская) об амплитудах глубинных волн от зарядов 135 и 25 кг тротила (кривые 1 и 2 рис.1). На базе этих кривых с учетом факторов, влияющих на амплитуду сигнала, был сделан пересчет к весу заряда 1 кг, который является удобным для пересчета амплитуд к базовому пневмоисточнику ПИ-5 (кривая 3 рис.1). Также по литературным данным (А.А.Островский) были получены максимальный, минимальный и средний уровни донных микросейсм в полосе регистрации аппаратуры и после полосовой фильтрации (рис.1). Соотношение кривой 3 с уровнем 1' дает нам искомую оценку C/P на различных удалениях. Основой для пересчета кривой 3 к модели ПИ служит энергетический запас источника и его КПД. Это позволяет использовать методику оценивания

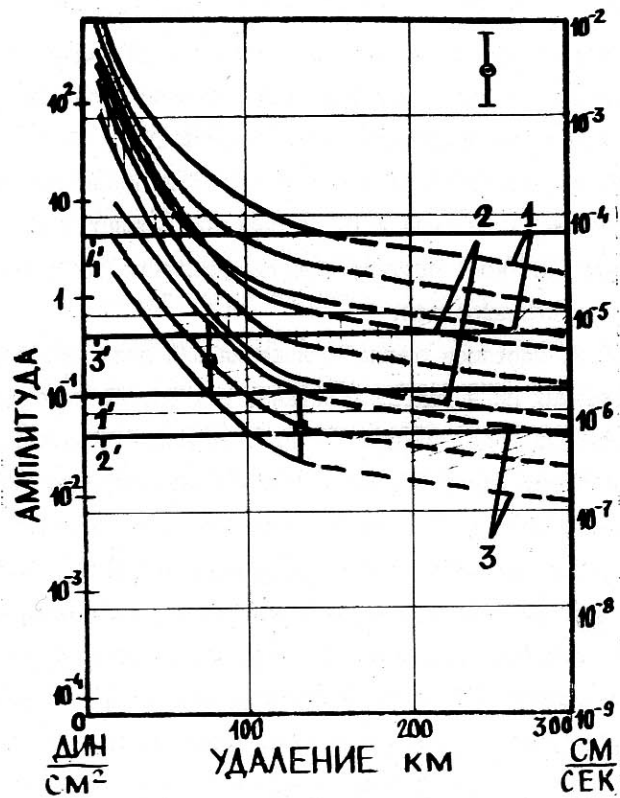


Рис. I. Оценки отношения сигнал/помеха для глубинных сейсмических волн в океане.
1 - от заряда 135 кг (С.М.Зверев)
2 - от заряда 25 кг (Ю.П.Непточнов)
3 - от ПИ-5.
1', 2', 3', 4' - уровни донных микросейсм (А.А.Островский).

С/П к любой морской излучающей системе. Для источника ПИ-5 при среднем уровне донных микросейсм после полосовой фильтрации в области рабочей частоты 10 Гц пределы дальности регистрации глубинных волн составляют 75-130 км.

В п. I.3. на основании оценок, сделанных в п. I.2., проведен анализ возможных порядков числа накоплений, необходимых для выделения сигналов на различных удалениях при условии идеально когерентного суммирования. Отмечено, что при фиксированной энергии источника эти величины в основном зависят от шумовых уровней различной природы (естественных и аппаратных). Например, при среднем уровне донных микросейсм число накоплений, необходимое для выделения сигнала от ПИ-5 на обратной стороне Земли, оценивается в 22500 (до С/П, равного 1), что по затрачиваемой энергии совпадает с аналогичными оценками для вибраторов (А.В. Николаев). Для выделения сигналов на удалении 300 км необходимо накопить около 25 реализаций. Также в данном разделе приведены оценки параметров групповых ПИ, состоящих из камер меньшего объема, чем ПИ-5, но создающих сигнал, близкий по частоте и амплитуде. Оценен энергетический выигрыш подобных групп ПИ по сравнению с одиночным источником с камерой суммарного объема.

В п. I.4. кратко изложены принципы формирования сейсмического импульса пневмоисточником с точки зрения частотного состава. Эта информация служит основой для определения различий принципов группирования ПИ в методах МОВ и ГСЗ. Подчеркивается, что задача создания мощного и широкополосного в диапазоне частот ГСЗ импульса логически приводит к исключению первых ударных максимумов сигналов ПИ из оптимизации их суперпозиции в группе, а также к формированию набора ПИ разного объема с частотами пульсаций, равномерно заполняющими выбранный диапазон. Обсуж-

дается вопрос, связанный с определением расстояний между элементами группы, при которых влияние взаимодействия воздушных пузырей мало. Кратко излагаются общие характеристики промышленных групповых ПИ, используемых в методе ГСЗ.

П.1.5. посвящен краткому изложению теоретических основ импульсного накопления сигналов. Перечислены факторы, искажающие идеальный рост C/P при накоплении, и дано математическое выражение влияния этих факторов на характеристику когерентной части записи. Приведен способ определения поправки величины роста C/P (М.Б.Рапопорт), возникающей из-за суммирования с разбросом времени. Приведены краткие описания первых экспериментов по накоплению сигналов от ПИ, поставленных в ИО АН СССР и ИФЗ АН СССР. Даны оценки выигрыша в числе накапливаемых реализаций, возникающего при применении групп ПИ, более эффективно использующих энергию, чем одиночный ПИ с камерой суммарного объема. Отмечено, что при увеличении амплитуды сигнала в K раз необходимое число реализаций сокращается в K в квадрате раз.

П.1.6. посвящен краткому изложению теоретических основ корреляционного накопления сложных сигналов. Ввиду того, что в сейсмике импульсные источники играют значительную роль, актуальным становится рассмотрение составных сигналов, использующих одиночные импульсы в качестве дискретов. Особо отмечается, что если в рамках одной реализации отклика среды источники, формирующие составной несинхронный сигнал, практически без потерь на взаимодействие могут быть реализованы синхронно, то формирование составного несинхронного сигнала в этом случае энергетически нецелесообразно. Также данный раздел посвящен описанию известных в литературе (Варвиер М.Г., Г.И.Буккина, С.В.Котельников, Б.Я.Карп) способов определения оптимальных параметров ПИ,

входящих в физические и моделируемые численно группы, формирующие несинхронный составной сигнал, без рассмотрения вопросов энергетической целесообразности той или иной модели. Излагаемые способы подбора параметров предназначены для получения составного сигнала с корреляционными свойствами, лучшими, чем у одиночного сигнала.

В п.1.7. сформулированы выводы по главе I, в которых резюмируется целесообразность основных задач работы, изложенных во введении. Качественно выделены принципы подбора параметров ПИ при численном моделировании импульсов от группы ПИ, организованной таким образом, чтобы при каждой реализации излучения добиваться минимальных энергетических потерь в нужном диапазоне частот, при условии приближения спектральной плотности к равномерной в данном диапазоне. Отмечена нецелесообразность корреляционного накопления импульсов от ПИ в случае возможности синхронной реализации дискретов. В случае, когда корреляционное накопление целесообразно, разрешающая способность АКФ лучше, если при формировании составного сигнала как либо учитываются спектральные свойства дискрета. Сделан вывод о возможности оценивания дальности регистрации волн от произвольной излучающей системы в условиях океана.

ГЛАВА 2 посвящена решению первой задачи - определению эффективности методики накопления слабых сейсмических сигналов при ГСЗ от пневмоисточников. В результате этого исследования получено экспериментальное доказательство возможности существенного увеличения глубинности ГСЗ при использовании накопления. Для решения поставленной задачи в 1980-1981 гг. на юго-западном побережье Каспийского моря Институтом океанологии АН СССР были проведены по профильной системе наблюдений экспериментальные рабо-

ты, положенные в основу данной главы.

В п.2.1. проведено обоснование выбора места эксперимента, схема которого представлена на рис.2. Отмечено, что первой причиной для проведения работ в данном районе послужила возможность осуществления длительных серий излучений при фиксированных положениях источника и приемников. При точности навигационных систем, которыми оснащен в настоящее время доступный для работы научный флот, реализация подобного эксперимента в условиях дрейфа судна вряд ли имеет смысл. Другой причиной является то, что ГСЗ здесь уже проводилось (см. рис.2) в 1956 г. ИФЗ АН СССР при помощи зарядов тротила 100-200 кг. Сравнение сейсмограмм подтверждает результативность накопления от источника ПИ-5, эквивалентного энергии 180 г тротила. Необходимо отметить, что поскольку уровень микросейсм в районе работ велик, то при максимальном удалении источник-приемник, равном 120 км и низком отношении С/П, данный эксперимент имитирует океанский эксперимент при том же отношении С/П с тем же излучателем, но на удалении источник-приемник не менее 300 км из-за более низкого уровня донных микросейсм.

П.2.2. посвящен описанию аппаратуры и методики работ, а также первичной обработке данных накопления. Стационарный пункт возбуждения был оборудован на морской эстакаде (см. рис.2) на расстоянии 12 км от берега излучателем ПИ-5 с объемом рабочей камеры 30 л, давлением 100 атм при погружении на глубину 8 м. Излучения проводились 1 раз в 2 минуты в течение 20 часов и более (не менее 600 излучений). Контроль формы импульса показал, что в целом она стабильна, но на основной частоте, равной 8 Гц, имеются флуктуации интенсивности около 10%. Также наблюдалось отклонение основной частоты $\pm 0,25$ Гц. Оценка влияния этих флуктуаций на результат накопления дала ухудшение его эффективности

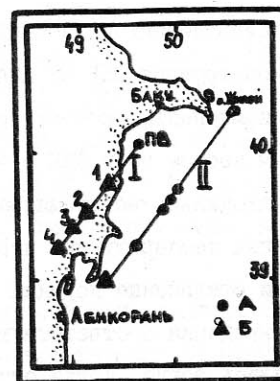


Рис.2. Схема расположения эксперимента по накоплению 1980-1981 гг. (I) и профиля ГСЗ, полученного ИФЗ АН СССР в 1956 г. (II)
А - пункты излучения; Б - пункты приема.

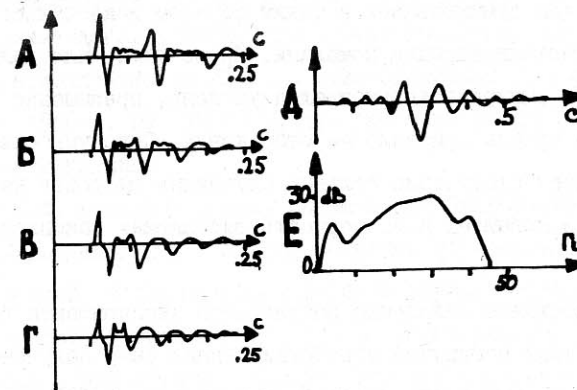


Рис.3. Формирование мощного и широкополосного в диапазоне частот ГСЗ импульса.
А,Б,В,Г - характеристики одиночных импульсов от ПИ с объемами камер 1.0, 0.5, 0.3 и 0.15 л соответственно;
Д - результат суммирования А,Б,В,Г с синхронизацией по повторным ударам и низкочастотной фильтрацией;
Е - амплитудный спектр Д.

на 15%. Для регистрации сейсмических колебаний использовались донные сейсмографы (ДС) конструкции ОКБ ОТ ИОАН. Была осуществлена запись вертикальной компоненты скорости смещения на магнитную ленту с последующим вводом ее в ЭВМ с частотой квантования 64 Гц. Поскольку ДС находились во время работы в условиях поверхности суши при сильных температурных перепадах, служба времени ДС давала за сутки отклонение порядка 10^{-1} с, которое контролировалось с целью введения соответствующих поправок при обработке. Поправка вводилась тогда, когда отклонение превышало шаг квантования по времени. Отклонение часов, как функция номера трассы, входило в программу ЭВМ и учитывалось автоматически. В виде аналогичной функции в ЭВМ вводилась информация о пригодности трасс для суммирования и таким образом исключались участки с сильными нестационарными помехами. Кроме того, для каждого пункта приема эмпирически выбирался уровень, превышение которого отсчетами трассы означало ее отбраковку. Совокупность этих мер гарантирует отсутствие сильных случайных выбросов на суммарных трассах и повышает достоверность выделяемых накоплением сигналов.

П.2.3. посвящен изложению результатов эксперимента и их обсуждению. В ходе первичной обработки данных было получено 4 суммарных сейсмограммы с кратностью суммирования от 150 до 360. При этом отношение С/П после накопления колеблется от 1,5 до 2,5. Суммирование, проведенное с учетом контролируемых значений некогерентности единичных трасс, остается под негативным влиянием недоучтенной компоненты некогерентности, величина которой была оценена в 1 шаг квантования. Моделирование ухудшения характеристики суммирования при случайном разбросе времен совместно с оценками по литературным данным дало снижение эффективности накопления по энергии на 20%, что вместе с влиянием флуктуаций

импульса дает значение 35% или 0,8 от идеального значения роста отношения С/П по амплитуде. Это позволяет точнее оценить исходные отношения С/П для накопленных сигналов и сравнить их с оценками по литературным данным в п.2.1. Совпадение амплитуд в пределах разброса кривой 3 рис.1 подтверждает соответствие проведенного эксперимента гипотетическому океанскому, но на удалении не менее 300 км.

На полученных сейсмограммах выделяется серия вступлений глубинных волн, соответствующих на пунктах 1,2 и 3 консолидированной коре, а на пункте 4 - мантии. Для доказательства этого соответствия были рассмотрены литературные данные об общих сейсмических свойствах земной коры в районе работ и рассчитана прямая задача, с результатом которой удовлетворительно совпадают экспериментальные данные. Кроме того, было проведено сравнение сейсмограмм, накопленных от ПИ-5, с сейсмограммами от взрывов, полученными в 1956 г. ИФЗ АН СССР, что также подтвердило результативность накопления.

П.2.4. посвящен поиску оптимальной фильтрации полученных данных. Приводимые в п.2.3. сейсмограммы обрабатывались полосовой фильтрацией. В дополнение к этому материал эксперимента был обработан корреляционным способом и деконволюцией. В результате расчетов можно прийти к выводу, что при отношении С/П в области 1 и узкополосном полезном сигнале существенно улучшить эффект применения полосовой фильтрации другими способами линейной обработки не удается.

В п.2.5. приведены выводы по главе 2, где отмечается, что первая из задач работы решена при помощи эксперимента по накоплению сигналов от ПИ в ГСЗ при отношении С/П на пунктах приема в области 0,1. Разработана методика автоматизированной обработ-

ки данных накопления с учетом контролируемых значений некогерентности единичных трасс, отбраковкой трасс, гарантирующая отсутствие сильных случайных выбросов на суммарных сейсмограммах. Доказательство результативности накопления проведено путем сравнения поставленного эксперимента с данными взрывов, полученными ранее. Поиск оптимальной фильтрации накопленных трасс не выявил способов, существенно улучшающих результаты полосовой фильтрации.

ГЛАВА 3 посвящена решению второй задачи - изучению возможности создания мощных и широкополосных в диапазоне частот ГСЗ импульсов при помощи групповых и одиночных ПИ. Применение импульсов с указанными свойствами улучшит детальность работ ГСЗ на море.

Задача решалась численным моделированием импульсов от групповых ПИ при помощи экспериментальных записей сигналов от одиночных ПИ, полученных в 1979 г. ИФЗ АН СССР во 2-ом рейсе ГС "Иван Киреев".

В п.3.1. приведено обоснование моделируемых физических систем группового и одиночного ПИ, и принципов, на которых осуществляется численный эксперимент. Из конечного числа одиночных импульсов с фиксированной энергией формировалась модель такого составного сигнала, который был бы широкополосным при минимальных энергетических потерях при суперпозиции. Этот процесс включает три этапа: математическое определение критериев, которым модель должна удовлетворять, определение параметров модели, при которых критерии оптимальным образом удовлетворяются, расчет модельного сигнала при этих параметрах.

Добиться мощного и широкополосного импульса от группы ПИ возможно, реализуя синхронизацию по пульсациям набора ПИ с ка-

мерами разных объемов, возбуждающими различные частоты пульсаций. Создать более мощный и широкополосный импульс от одиночного ПИ возможно, распределив запасенную им энергию на порции, выпускаемые в среду последовательно во времени и сжимаемые при обработке корреляционным способом. Это дает суммарный выигрыш в амплитуде по сравнению с сигналом при реализации всей энергии одновременно, равный $\sqrt[6]{N}$, где N - число порций. Высказаны соображения о том, какие технические усовершенствования помогут реализовать этот режим работы ПИ. Подчеркнуто, что если одиночные импульсы ПИ, формирующие составной сигнал, предназначенный для корреляционной обработки, могут быть реализованы без существенных потерь на взаимодействие, то реализация несинхронной их последовательности энергетически нецелесообразна. Кроме моделирования составных сигналов проводился численный эксперимент выделения этих сигналов на фоне помех при различных отношениях С/П. Масштабирование кривой 3 рис.1 к параметрам модели ПИ дало возможность поставить значения С/П в соответствие реальным дальностям регистрации волн в океане.

П.3.2. посвящен математической формулировке задач о составном сигнале от группы пневмоисточников, которая базируется на радиолокационных представлениях (Л.Е.Вагман, Р.М.Седлецкий, Л.Е.Варакин). Будем считать, что оптимальным желаемым импульсом в частотной области для приближения составного сигнала или его АКФ при отсутствии взаимодействия между ПИ является вещественная константа в рабочем диапазоне частот. Условие, соответствующее формированию широкополосного сигнала в выбранном диапазоне частот, или требование детальности формулируется в виде:

$$F = \int_{\omega_1}^{\omega_2} (c - \sum_{k=1}^N S_k(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau_k})^2 d\omega = 0 \quad (I)$$

где ω_1, ω_2 - граничные частоты рабочего диапазона,
 $S_k(j\omega)$ - характеристика К-ого источника,
 τ_k - задержка К-ого источника, N - число источников.

Требование минимизации энергетических потерь при суперпозиции фиксированного набора импульсов с заданной энергией формулируется в виде:

$$\frac{E_{\Sigma}}{\sum_{k=1}^N E_k} = 1 \quad (2)$$

где E_{Σ} - энергия суммарного импульса,
 E_k - энергия К-ого одиночного сигнала. Модификации этой пары условий в зависимости от конкретной физической системы, моделируемой численно, являются математической формулировкой задач о составном сигнале. Точное одновременное соблюдение этих условий при моделировании невозможно: они указывают направление поиска оптимума по параметрам амплитуды, частоты пульсаций и задержки суммирования импульса в группе.

В случае группы ПИ, состоящей из камер разного объема, получить решение можно следующим образом. Поскольку фильтрующее действие среды подавляет в сигнале все гармоники кроме пульсационной, а максимальная пиковая мощность этой частоты приходится на 2-ой или 3-ий удар пузыря, то синхронизацию ПИ целесообразно проводить по повторным ударам. Отфильтрованные сигналы ПИ разного объема выглядят как отрезки различных синусоид с несимметричной колокольной огибающей, которые при суперпозиции дают импульс, близкий к нульфазному. Этим обеспечивается соблюдение условия (1). Соблюдение условия (2) обеспечивается тем, что дискреты суммируются при синхронизации по моментам с максимальной пиковой мощностью. Таким образом, решение для пара-

метров в этом варианте задачи о составном сигнале вытекает из общих соображений.

В случае работы одиночного ПИ по режиму, указанному в п.3.1, физической ситуации может соответствовать две модели несинхронного составного сигнала, обрабатываемого корреляционным способом, что приводит к рассмотрению модуля спектра условия (1). Первой моделью является последовательность дискретов с разной частотой пульсации, соответствующая ситуации, когда по мере неполных выхлопов давление в камере падает и частота растет, или ситуации, когда при помощи длительности отпирающего импульса регулируется объем каждой порции. Близкое к оптимальному решение задачи для условий (1) и (2) также вытекает в данном случае из общих соображений. Условие (1) соблюдается тем, что частоты пульсаций дискретов приблизительно равномерно заполняют рабочий диапазон, а функция кода берется псевдослучайной с минимальной разницей элементов не меньшей эффективной длительности дискретов. Условие (2) при этом также оптимально, поскольку дискреты не перекрываются. Другой моделью является последовательность одинаковых дискретов. В этом случае параметрами модели, влияющими на значения условий (1) и (2), является последовательность задержек τ_k , и решение не следует из общих соображений. Появляется необходимость постановки оптимизационной задачи. Отметим, что приближение спектральной характеристики составного сигнала к равномерной в этом случае будет происходить за счет компенсации кодом наиболее мощных гармоник в спектре дискрета, что приводит к сильным энергетическим потерям и низкому значению условия (2). В связи с этим целесообразность практического применения последней из рассмотренных моделей в сейсмике, по-видимому, отсутствует.

П.3.3. посвящен некоторым особенностям решения оптимизационной задачи. Обсуждается стратегия оптимизации условий (1) и (2) и свойства решений. Подтвержден вывод о малой практической значимости третьей модели, рассмотренной в п.3.2.

В п.3.4. приведены примеры моделей составных несинхронных сигналов и результаты выделения их на фоне помех корреляционным способом. Рассмотрены модели из одинаковых и разных дискретов для 5 и 10 источников.

В п.3.5. приведен пример модели составного сигнала от несинхронно срабатывающей группы ПИ разных объемов и результаты выделения его на фоне помех. На рис.3 представлены образцы одиночных импульсов (А,Б,В,Г) от ПИ, результат суперпозиции этих импульсов после предварительной низкочастотной фильтрации при синхронизации по повторным ударам (Д) и амплитудный спектр суммарного импульса (Е). Этот пример демонстрирует эффект группирования ПИ по I-ой модели, изложенной в п.3.2.

В п.3.6. перечислены выводы по главе 3, в которых сформулированы принципы формирования мощных и широкополосных в диапазоне частот ГСЗ импульсов от группового и одиночного пневмоисточников. Обоснована целесообразность одного из вариантов технического развития ПИ. Кратко изложена математическая формулировка задач о составном сигнале. Отмечено, что параметры первых двух моделей, изложенных в п.3.2., дающие близкие к оптимальным значения условия (1) и (2), следуют из общих соображений, а в случае третьей модели необходимо решать оптимизационные задачи. Результаты этого решения практического применения в сейсмике не имеют. Анализ особенностей выделения сигналов на фоне помех различными способами показал, что при отношении С/П в области I отличительные свойства различных методов линейной фильтрации

сглаживаются.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ обсуждаются перспективы применения предлагаемых способов расширения физических возможностей метода ГСЗ на море. Отмечается, что дальнейшие исследования по затронутым проблемам могут развиваться в следующих направлениях: проведение экспериментальных работ по накоплению с более точными судовыми навигационными системами, экспериментальное и численное изучение влияния малых флуктуаций импульсов на стабильность волнового поля на большом удалении в случайно-неоднородной среде, практическое исследование возможностей ПИ по созданию мощных и широкополосных сигналов для ГСЗ на море.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Решение первой задачи работы, связанной с увеличением глубинности метода ГСЗ на море, дает возможность сформулировать следующее.

1. Предложена схема получения предельных оценок дальности регистрации глубинных волн для произвольного морского источника сейсмических колебаний с учетом последующей математической обработки и оценок числа накоплений, необходимого для выделения слабых сигналов на фоне помех на нужном удалении.

2. Разработан алгоритм автоматизированной обработки данных накопления с учетом контролируемых значений некогерентности суммируемых воздействий, гарантирующий отсутствие сильных случайных выбросов на суммарной трассе.

3. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность получения геофизической информации в ГСЗ накоплением слабых сигналов от пневмоизлучателей по профильной системе наблюдений на удалении до 120 км при отношении сигнал/помеха на пунктах при-

ема в области 0,1 при наличии факторов, снижающих результативность накопления. Проведенный эксперимент в случае океанских условий эквивалентен по отношению сигнал/помеха накоплению на удалении не менее 300 км.

Решение второй задачи работы, связанной с увеличением детальности метода ГСЗ на море, дает возможность сформулировать следующее.

4. Сформулированы рекомендации по формированию мощного и широкополосного в диапазоне частот ГСЗ импульса от субсинхронно срабатывающих групп разных пневмоисточников, заключающиеся в синхронизации отдельных импульсов по повторным ударам.

5. При помощи численного моделирования обоснована целесообразность одного из вариантов развития пневмоизлучающих систем, связанного с реализацией энергии, накопленной в одиночном источнике на один отклик среды, в виде распределенной во времени последовательности неполных выхлопов сжатого воздуха, формирующих составной сигнал, обрабатываемый корреляционным способом.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. О влиянии спектра шума на отношение сигнал/помеха при корреляционном выделении сейсмических сигналов в океане. Океанология, 1985, т.25, вып.1, с.162-165.
2. Результаты экспериментов по накоплению сейсмических сигналов от стационарного пневмоизлучателя на юго-западном побережье Каспийского моря. Океанология, 1985, т.25, вып.2, с.319-324. (совместно с Ю.П.Непрочновым, В.В.Седовым, А.А.Островским)
3. Использование пневматических излучателей сейсмических волн для создания сложных сигналов. Тезисы докл. Всесоюзного совещания по техническим средствам и методам изучения океанов и

морей. Геленджик, 1985, ИО АН СССР, с.29 (совместно с Ю.П.Непрочновым).

4. Расчет параметров группы пневмоизлучателей, создающей сложный сигнал. В кн.: Современные геофизические исследования. М., ИФЗ АН СССР, 1987, т.2, с.200-203 (совместно с В.Н.Ефимовым).
5. Управляемый пневмозатвор источника сейсмических сигналов. АС СССР, № 1434991, МКИ G 01 V 1/137 (совместно с В.Н.Ефимовым, П.Н.Ефимовым и В.М.Побержинным).

Подписано в печать 15.02.90. Л-34082 Заказ 639
Тираж 100 экз. Формат 60x84¹/16 Уч.-изд.л. 1,2
ИИЗИО5, Москва, Варшавское ш., 8, ВНИИ геоинформсистем