

На правах рукописи

Детков Владимир Алексеевич

**Повышение эффективности управления импульсными
невзрывными источниками «Енисей» при сейсморазведочных
работах**

Специальность 05.11.13. «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

Специальность 25.00.10. «Геофизика, геофизические методы поиска
полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск - 2009

Диссертация выполнена в ОАО «Енисейгеофизика» (г. Красноярск)

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук,
профессор *Шайдуров Георгий Яковлевич*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Кашкин Валентин Борисович

доктор технических наук, профессор

Поздняков Владимир Александрович

Ведущая организация: Институт нефтегазовой геологии и геофизики
Сибирского Отделения Российской Академии Наук им. А.А. Трофимука
(ИНГГ СО РАН) (г. Новосибирск)

ё

Защита диссертации состоится «26» июня 2009 г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета ДМ 212.099.05 при Сибирском федеральном
университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26,
УЛК 1-15.

С диссертацией можно знакомиться в библиотеке по техническим наукам
Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан «25» мая 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Вейсов Е.А.

На период 70-х гг. приходится начало интенсивного изучения геологического строения Сибирской платформы сейсмическими методами. К этому времени активно начала развиваться вибрационная технология, которая поддерживалась Министерством геологии СССР. При централизованном финансировании были построены предприятия по производству вибраторов в г. Армавире и в г. Гомеле. Импульсная невзрывная технология тогда была представлена газодинамическим источником ГСК. Руководство Министерства геологии СССР не посчитало оправданным развитие еще одного производства импульсных источников.

Между тем, для условий Восточной Сибири существующие источники оказались неоптимальными по нескольким причинам. Бурение взрывных скважин зачастую было невозможно из-за выхода на поверхность трапповых магматических покровов, которые относятся к 9-10 категории бурения. В свою очередь, наличие трапповых тел требовало особого подхода к изучению верхней части разреза. Важной составляющей изучения ВЧР является информация из первых вступлений сейсмограмм ОПВ. Как известно, вибрационная технология не всегда обеспечивает качественные первые вступления сейсмограмм. Поэтому применение вибраторов также не могло в полной мере удовлетворить сейсморазведчиков Восточной Сибири. Импульсные источники ГСК-6, ГСК-10 по своим параметрам также не выдерживали никакой критики. Сложность их обслуживания и эксплуатации (пропан, кислород), очень большая длительность формирования импульса (5-10 мс), неидентичность условий возбуждения из-за разрушения грунта, ограниченность применения в условиях низких температур - вот далеко не полный перечень тех недостатков, которые имели эти газодинамические источники.

Таким образом, наличие многих факторов, как технологических, так и сейсмогеологических, не позволяло выбрать из всех существующих источников наиболее оптимальный для условий Восточной Сибири. Оставался один выход - создание нового невзрывного источника более всего адаптированного к сложным условиям горно-таежной местности и непростым сейсмогеологическим условиям. И такой тип источника, в содружестве с Тольяттинским политехническим институтом (Ивашин В.В.), был найден - это импульсный источник [1, 2, 3], основанный вначале на электродинамическом, а затем и на электромагнитном принципе возбуждения сейсмических колебаний.

Руководителем геофизической службы Красноярского края Сибгатуллиным В.Г. было предложено и блестяще осуществлено решение Министерства геологии РСФСР о строительстве опытного производства в г. Минусинске. В конце 70-х годов первые источники были внедрены в практику сейсморазведочных работ.

В кооперации с Тольяттинским политехническим институтом (ныне Тольяттинский государственный университет) был разработан и внедрен в производство импульсный электромагнитный источник [1], который позволяет реализовать очень короткое время воздействия. Из-за

принципиально иного решения воздействия на грунт за счет движения массы пригруза вверх, а излучающей плиты вниз, обеспечивается согласованное со скоростью деформации грунта механическое воздействие. Такой способ создания механического напряжения позволяет грунту наиболее полно, не разрушаясь, проявлять свои упругие свойства.

К 1988 году опытное производство в г. Минусинске изготавливало 25-30 источников в год, к 1990 году объем работ с невзрывной технологией достиг 50-60% от общего объема сейсморазведочных работ. С момента создания ОАО "Енисейгеофизика" невзрывными источниками, в основном собственного производства, отработано около 60 тысяч погонных километров сейсмопрофилей.

На протяжении всех лет производства электромагнитных источников "Енисей" шло непрерывное совершенствование их эксплуатационных характеристик, создавались новые модификации, обновлялась система управления, увеличивалась мощность. Изначально создаваемый для специфических условий Восточной Сибири, электромагнитный источник "Енисей" сегодня благодаря широкому ряду модификаций (санные, колесные, водные), стал универсальным источником для любых поверхностных и сейсмогеологических условий. Сегодня невзрывные источники работают в Европейской части России, на Урале, в Западной и Восточной Сибири, в Якутии, на Камчатке, в Казахстане.

Производство электромагнитных источников "Енисей" в ОАО "Енисейгеофизика" уже давно вышло за рамки опытного, и их дальнейшее совершенствование, разработка новых модификаций с учетом требований современного процесса геофизического исследования недр требует больших затрат. Назрела необходимость кооперации с заинтересованными научными и производственными организациями для создания конкурентоспособного на мировом рынке невзрывного импульсного источника [4, 5, 6].

За рубежом невзрывная сейсморазведка получила распространение в виде вибрационных источников с непрерывной частотной модуляцией сейсмических волн. Между тем, в связи с появлением в России импульсных невзрывных источников, зарубежные геофизики начали проявлять повышенное внимание к импульсным системам. Реализован ряд контрактов на поставку источников «Енисей» в США, Францию, Индию.

Большой вклад в развитие невзрывной сейсморазведки в России сделан Шнеерсоном, Циммерманом, Чичениным и др.; в разработку импульсных невзрывных источников «Енисей» сотрудниками Геотехцентра (г. Минусинск) – Федотовым И.Г., Смирновым, Шварковым, Матвеевым.

В обработку и внедрение в практику импульсной методики – сотрудники ОАО «Енисейгеофизика» Федотов И.Г., Муртаев И.С., Карболев И.А., Корсунов И.В., Струнов В.А., Щадин П.Ю.

Целью работы является разработка и реализация предложений по повышению эффективности импульсных невзрывных источников.

Методы исследования

Применены методы линейного и спектрального анализа, теории сейсморазведки, оптимизации функционалов, статистической теории обработки сигналов.

Защищаемые положения

1. Принцип действия, заложенный в импульсный невзрывной источник (ИНИ) типа «Енисей», обеспечивает сохранность грунта под плитой-антенной за счет волнового характера приложения силы удара вначале вверх относительно грунта, затем, в обратном направлении с запаздыванием по времени, относительно постоянной времени пластической деформации грунта определяемой законом Гука.

2. Предельное отношение сигнал/синхронная помеха не зависит от мощности источника излучения и определяется усредненным по частоте отношением сигнал/синхронная помеха.

3. Алгоритм оперативной оценки полезного сигнала, заключающийся в определении спектральных характеристик полезного сигнала на выходе ближайшего к источнику сейсмоприемника по ближним и дальним задержкам, затем через отношение найденных спектральных характеристик определяется спектр полезного сигнала и через обратное преобразование Фурье выделяется временная структура сигнала.

4. Методика управления частотой излучения группы импульсных невзрывных источников путем последовательного их включения с временным запаздыванием соответствующим периоду повторения излучаемой частоты.

5. Методика снижения вибрационных помех со стороны привода генератора заряда путем его замены на аккумуляторы и заглушкой в рабочий момент.

6. Методика снижения микросейсм путем погружения сейсмоприемников в неглубокие скважины.

Новые научные результаты

1. Впервые предложен способ воздействия на среду, отличающийся обратным направлением действия импульса силы по отношению к поверхности грунта с временным запаздыванием по отношению к деформации грунта, что позволило многократно поднять КПД источника и сохранить целостность поверхности грунта.

2. Впервые способ реализован в промышленном исполнении в виде импульсного электромагнитного источника возбуждения сейсмических колебаний серии «Енисей» (производитель ОАО «Енисейгеофизика»), которыми отработано за последние 10 лет около 60 тысяч погонных километров сеймопрофилей.

3. Предложен способ оценки отношения сигнал/помеха на основе обработки сигнала первого удара путем спектрально-временных преобразований сигналов группы сейсмоприемников, ближайших к источнику, что

позволяет оптимально оценивать количество ударов и тем самым повысить скорость разведки.

4. Предложен метод кодирования воздействия группы излучателей путем подбора времени запаздывания и формы огибающей группы импульсов излучения, и временной формы сигналов возбуждения отдельных излучателей, позволяющих эффективно возбуждать сейсмические колебания на определенной глубине и в заданном спектральном окне.

5. Экспериментальными работами в различных регионах страны и различными организациями подтверждена эффективность работы импульсных электромагнитных невзрывных источников с промышленным производством серии их модификаций.

Практическая значимость работы

- Разработанный способ воздействия на грунт реализован в серии изделий «Енисей» в различных модификациях:

Изделие «Енисей» серийно выпускается предприятием «Геотехника» (г. Минусинск) с конца 70-х годов и прошло широкое апробирование в различных геолого-геофизических условиях в России, а также прошло испытания за рубежом (Франция, Индия).

- Прошел экспериментальную проверку метод возбуждения источника с работой от аккумулятора с использованием специального зарядного устройства, разработанного с участием и по техническому заданию автора.

- Способ оптимизации режимов работы сейсмического источника и их группы прошел экспериментальную проверку на испытательном полигоне ОАО «Енисейгеофизика» и вошел в техническое задание на аппаратную реализацию.

- Внедрен в полевую практику метод работы с сейсмоприемниками, заглубленными в неглубокие скважины, что позволило существенно сократить их число и существенно снизить шумовые микросейсм.

Апробация работы

Основные результаты работы представлялись на всероссийских научно-практических конференциях – VII Международной в г. Геленжике (2005 г.), Новосибирске 2006 г. – три доклада, ежегодных Российских семинарах по сейсморазведке г. Минусинск, п. Шира 2004, 2005, 2006, 2007 гг., опубликованы в 10 журнальных статьях.

По материалам работы получено 2 патента и одно авторское свидетельство на изобретение.

Личный вклад автора

Поставлена проблема создания «умного источника», позволяющего в адаптивном режиме управлять его основными параметрами, повышающими эффективность сейсморазведочных работ с использованием источников типа «Енисей», определены физические основы действия этого типа источников в виде волнового характера взаимодействия с грунтом без его разрушения, разработаны системные модели формирования сейсмических сигналов и

алгоритмы оценки отношения сигнал/шум в процессе работы, предложены и экспериментально проверены алгоритмы управления частотой излучения группы источников, предложены и экспериментально проверены методы снижения шумов путем зарядки конденсаторов источника от аккумуляторных батарей и заглубления сейсмоприемников в небольшие скважины.

Все результаты численных расчетов проанализированы автором самостоятельно, а экспериментальные полевые работы проведены под непосредственным руководством и участии диссертанта.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.т.н., проф. Шайдурову Г.Я. и научному консультанту д.т.н., проф. Ивашину В.В. за помощь в постановке проблемы и консультации по математическим моделям решения поставленных задач.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы. Работа содержит: 183 страниц, 68 рисунков, 4 таблиц, 7 приложений. Список литературы – 39 наименований.

Содержание работы

В первой главе изложены исходные предпосылки для диссертационного исследования, дается анализ известных разработок в области невзрывной техники сейсморазведки, описываются конструктивные особенности и преимущества разработанных при участии автора импульсных невзрывных источников «Енисей», формулируются основные научные проблемы, решаемые диссертацией.

Обычно импульсный источник поверхностного типа генерирует сейсмические волны созданием деформации грунта x при воздействии на плиту-антенну силой $P(t)$ (рис. 1а).

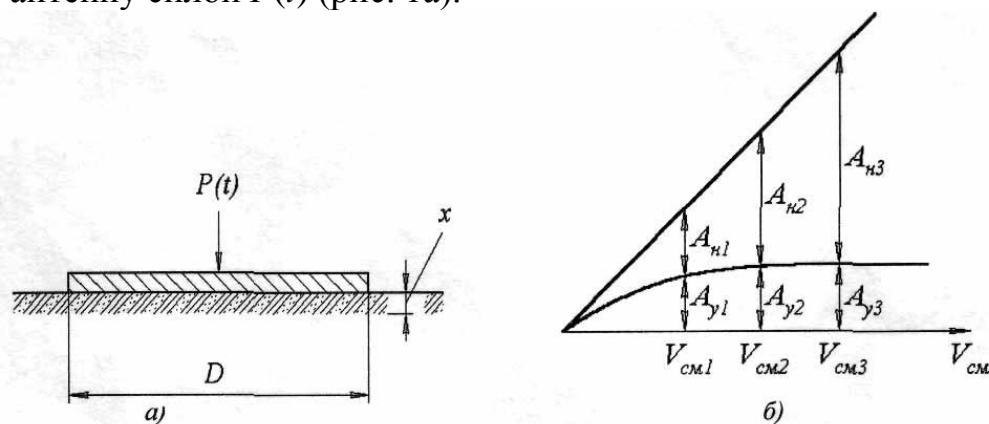


Рис. 1 а) - упрощенная принципиальная схема; б) - качественная зависимость энергии A_n – неупругой и A_y – упругой деформации грунта от скорости смещения $V_{см}$

При деформации грунта энергия, поступающая от источника силы $P(t)$, затрачивается на уплотнение грунта (переходит в тепло) и на создание упругой части деформации, следствием которой является создание сейсмических волн различного типа: поверхностной, поперечной и продольной. Сейсмическая эффективность сейсмоисточника определяется интенсивностью продольной волны. С увеличением силы $P(t)$ увеличивается скорость смещения $V_{см}$ частиц в прилегающем к плите слое грунта и давление σ в грунте, определяющее с учетом диаметра D плиты реакцию грунта при его деформации. Известно, что при распространении сейсмической волны в грунте механические напряжения a в нем определяются скоростью $V_{см}$ и волновым сопротивлением $C = \rho \cdot V \delta$, где ρ – плотность грунта, $a = V \delta$ – скорость распространения продольной сейсмической волны

$$V_{\tilde{m}} = \sigma / \rho \cdot V \tilde{p} \quad (1)$$

При увеличении $V_{см}$ увеличиваются механические напряжения в грунте под плитой, что соответственно приводит к увеличению потерь на неупругие деформации грунта и снижению коэффициента преобразования энергии воздействия на грунт в энергию его упругой деформации. Графики на рис. 1 показывают качественную зависимость распределения энергии воздействия A на грунт между энергией, затрачиваемой на неупругую A_n и упругую A_v деформацию. При $V_{см} > (0,5 \div 1)$ м/с существенного приращения упругих деформаций грунта не происходит, а энергия A воздействия на грунт затрачивается в основном на диссипацию при уплотнении грунта и поверхностные волны (Ивашин В.В. и др.).

Например для грунтов средней прочности, характеризуемыми параметрами $\sigma = 5 \cdot 10^5$ Па (5 кгс/см²), $\rho \approx 2000$ кг/м³ и $V \approx 300$ м/с:

$$V_{\tilde{m}} = \frac{\sigma}{\rho \cdot V p} = \frac{5 \cdot 10^5}{2000 \cdot 300} = 0,83 \text{ м/с} \quad (2)$$

Важно отметить, что при увеличении прочности грунта под плитой увеличиваются σ , ρ и $V p$. Рациональное же значение создаваемой скорости деформации грунта при этом изменяется менее значительно и может быть принято равным $\sim 0,5 \div 1$ м/с. По крайней мере, существенное превышение скорости $V_{см1}$ плиты при деформации ею грунта представляется нежелательным.

Важной характеристикой сейсмоисточника, существенно определяющей его вес и стоимость, является время τ деформации грунта плитой-антенной. В работе Харкевича А.А. [6] теоретически показано, что даже при деформации грунта с постоянной скоростью время формирования сейсмической волны определяется соотношением:

$$\tau = \frac{D}{V_p}.$$

За время τ деформации грунта положительное значение давления в грунте под плитой уменьшается до нуля (и даже может изменить знак). Например, при $D \approx 2$ м и $V_p \approx 300$ м/с время $\tau \approx 6,6 \cdot 10^{-3}$.

Величина и длительность прикладываемой к плите силы, в значительной мере определяющие весовые, стоимостные и эксплуатационные показатели сейсмоисточника, были положены в основу проектирования сейсмоисточников "Енисей".

Для сейсмоисточников был разработан специальный электромагнитный привод, содержащий короткоходовой электромагнит с импульсной системой возбуждения магнитного поля, обеспечивающий необходимые воздействия на плиту-антенну при высоком КПД преобразования потребляемой энергии в механическую.

Недостаточная сейсмическая эффективность разрабатывавшихся ранее и не нашедших достаточно широкого применения невзрывных сейсмоисточников обусловлена в основном тем, что они не обеспечивали эффективную передачу механической энергии двигателя в энергию упругих деформаций грунта. Например, в сейсмоисточниках типа "падающий груз" при падении ударника с высоты $H_0 = (2+3)$ м с ускорением силы тяжести скорость воздействия на грунт $V_{см} \sim (6+8)$ м/с, при которой энергия воздействия на грунт в основном затрачивается на неупругие деформации грунта (на его уплотнение и даже разрушение). Газодинамические сейсмоисточники также воздействовали на грунт со скоростями во много раз превышающими скорости смещения $[V_{см}]$ частиц грунта при распространении сейсмической волны. В сейсмоисточниках "Сейсмодин" был применен электродинамический двигатель с рабочим ходом $\sim 20 \cdot 10^{-3}$ м, превышающим смещение плиты при деформации грунта в 10-20 раз. При работе сейсмоисточника основная часть механической энергии такого двигателя передается в реактивную массу (до 90-95 %), а не в энергию деформации грунта.

Отличительной особенностью источников типа «Енисей» является волновой характер воздействия на грунт, при котором первоначальное действие силового импульса направлено вверх относительно грунта, а последующий удар вниз действует на грунт с временным запаздыванием по отношению к постоянной времени пластической деформации, определяемой законом Гука.

На рис. 2,а приведены упрощенная конструктивная схема сейсмоисточников "Енисей" и характер изменения скорости и перемещения плиты (v_n, x_n), якоря (v_y, x_y) электромагнита и инерционной массы - пригруза (v_p, x_p) при работе сейсмоисточника. При пропускании тока по обмотке возбуждения 5 от импульсной схемы силового питания (особенности работы системы питания будут рассмотрены ниже), через зазор δ_0 между

магнитопроводом 6 якоря и полюсами магнитопровода 4 индуктора - пригруза электромагнита проходит магнитный поток Φ , и между якорем и индуктором создаётся сила $P(t)$, которую можно принять постоянной по величине.

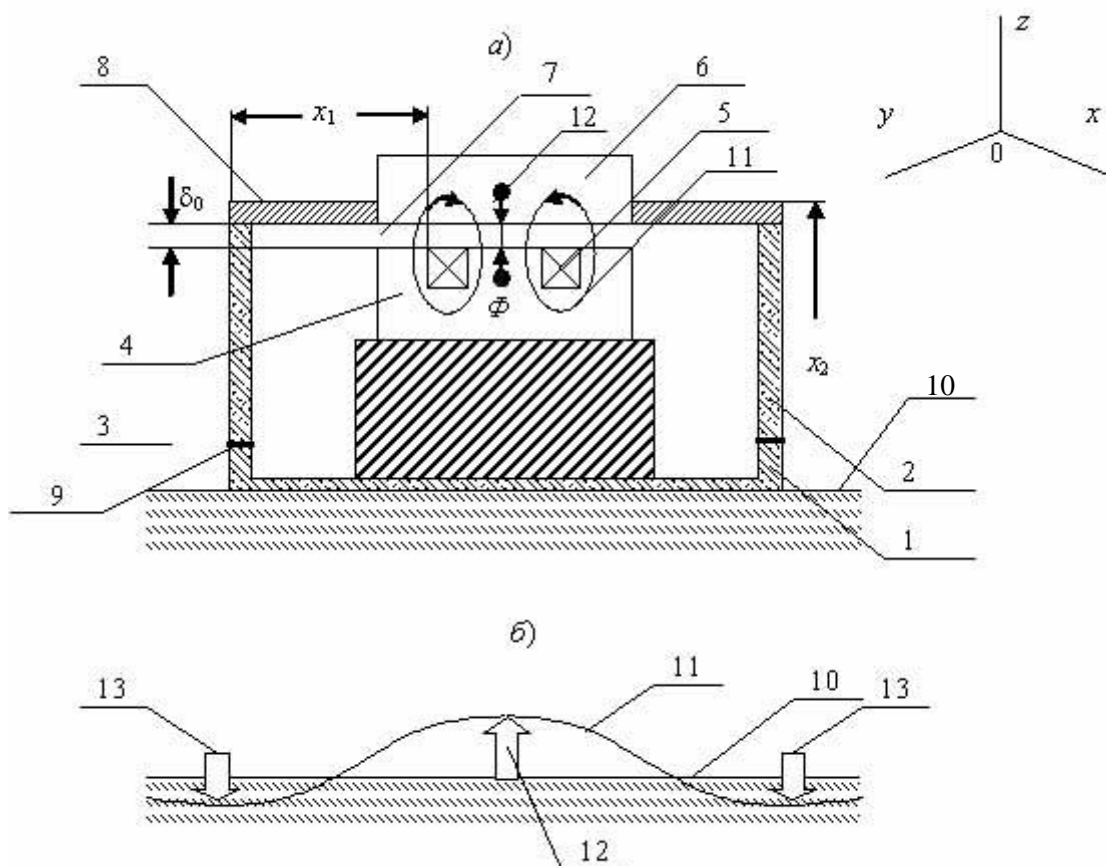


Рис. 2. Конструктивная схема импульсного невзрывного источника «Енисей» и эпюра действующих сил

В исходном положении, до подачи импульса тока на индуктор 4 поверхность грунта 10 придавлена опорной плитой 1, стойками 2 и пригрузом 3.

При подаче импульса тока на обмотку индуктора 4, последний начинает движение вверх по координате z , освобождая опорную плиту 1 от веса пригруза 3.

Сила притяжения индуктора через якорь 6, раму якоря 8, стойки 2 и демпферы 9 передается на края опорной плиты 1. В результате поверхность грунта под опорной плитой принимает волновую форму 11, а приложенный к индуктору импульс силы сглаживается элементами конструкции генератора, в частности демпферами 9. В этом случае деформация грунта всегда отстает по времени на величину $(\tau - \tau_{\Gamma})$ от фронта нарастания силового воздействия индуктора, а связь силы давления на грунт σ с его деформацией подчиняется закону Гука:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга, ε – деформация грунта.

Если зазор между якорем и корпусом равен δ_0 , то время прохождения индуктором зазора равно $\tau_y = \frac{\delta_0}{v_y}$, где v_y – скорость движения индуктора.

Время распространения механического воздействия по консолям пригруза и стойкам до грунта равно:

$$\tau_i = \frac{x_1 + \tilde{\sigma}_2}{v_i}.$$

Суммарное время действия импульса на грунт

$$\tau = \tau_y + \tau_i.$$

На рис.3 изображены зависимости действующих сил от времени, где I – импульс тока в обмотке электромагнита; $\varepsilon(t)$ – изменение деформации грунта; $P_m(t)$ – силовое воздействие на грунт.

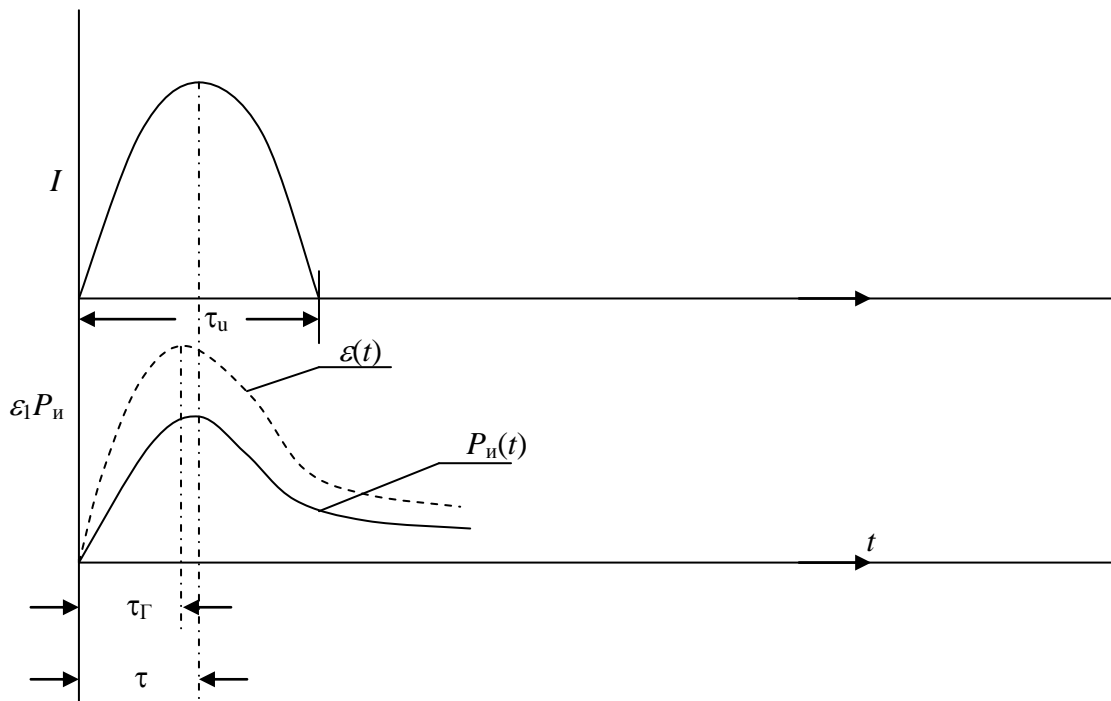


Рис.3. Временные эпюры действующих сил

Дальнейшее совершенствование импульсной технологии видится в следующем:

1. Повышение КПД преобразования электрической энергии в сейсмическую за счет оптимизации конструкции и введение адаптивного управления формой импульса и числа ударов по текущему отношению сигнал/шум.
2. Оптимизация управления группой ИНИ в сторону повышения отношения сигнал/синхронная помеха.
3. Управление диаграммой направленности излучения группы ИНИ.

4. Снижение уровня несинхронных помех оптимизацией технологий приема и обработки сигналов.

5. Необходимо ответить на вопрос о пределах повышения мощности излучателя, например, почему при существенном превышении энергии излучения невзрывных импульсных источников над энергией ИНИ в практике работ зачастую оба источника дают одинаковые геофизические результаты.

6. Поскольку из-за инерционности электромеханической части ИНИ одиночный источник не может работать в выбранном узком участке диапазона частот, представляется перспективным исследовать возможности управления спектром излучения группы ИНИ путем их последовательного возбуждения.

Управление синхронизацией группы источников с позиций изменения направленности сейсмического излучения чрезвычайно интересно для сложных геологических условий разведки в Восточной Сибири и на Дальнем востоке.

Вторая глава посвящена описанию математических моделей сигналов и синхронных помех с использованием системного подхода [7].

Исходя из общепринятых представлений в сейсморазведке о линейности физических процессов формирования и распространения сейсмических колебаний в геологической среде, процесс формирования сигналов смоделирован в виде структурной схемы включающий передаточные функции (ПФ) $I(p)$ невзрывного источника, прилегающего к нему грунта Φ_2 и однородных слоев геологического разреза: для первого слоя Φ_{12}, Φ_{24} , для второго слоя $\Phi_{15}, \Phi_{53}, \Phi_{36}, \Phi_{64}$ (рис.4).

Коэффициенты R_1 и R_2 моделируют отражение сейсмической волны от соответствующего слоя.

ПФ $\Phi_{сп}$ описывает свойства линейной части приемника сеймосигналов. $N_{ш1}, N_{ш2}$ – спектральные плотности мощности внешних помех и внутренних шумов сеймоприемника, несинхронные с полезным сигналом. $\hat{O}_A - \ddot{I} \hat{O}$ источник – грунт, $\hat{O}_A - \ddot{I} \hat{O} \ddot{N}$.

Для этой модели комбинация полезного сигнала и шума записывается в виде:

$$U(t, p) = I(t, p) \otimes \hat{O}_a \otimes \hat{O}_n \otimes \hat{O}_m + \quad (4)$$

$$+ I(t, p) \hat{O}_a \otimes \hat{O}_i \otimes \hat{O}_m + [N_{\phi 1} \otimes \hat{O}_m^2]^{1/2} + [N_{\phi 2} \otimes \hat{O}_m^2]^{1/2},$$

где $I(t, p)$ – функция возбуждения источника, зависящая от текущего времени t или комплексной частоты $p = c \pm j\omega$;

$\hat{O}_2(t, p) = \hat{O}_{12} \otimes \hat{O}_{53} \otimes R_2 \otimes \hat{O}_{36} \otimes \hat{O}_{64}$ – ПФ второго слоя сигнала.

Аналогично могут быть получены модели сигналов и синхронных помех для многослойной модели георазреза. \otimes – знак функционального перемножения в пространстве времени t или комплексной частоты p .

Считая, что СП формируется лишь неоднородным первым слоем, полезный сигнал отраженной волной второго слоя, при существенном превышении уровня полезного сигнала и СП над некоррелированными шумами, отношения второго члена (4) к первому даст ПФ полезной части отраженного сигнала:

$$\hat{O}_{56}(\delta) = \hat{O}_{53}(\delta) \frac{R_2}{R_1} \hat{O}_{36}(\delta). \quad (5)$$

При этом ПФ слоев определяются через преобразование Фурье-Лапласа от временных функций сигналов отраженных на ранних и поздних временах вступления.

Обратно преобразование Лапласа от (5) дает временную функцию полезного сигнала:

$$U_{56}(t) = \int_{-C-j\infty}^{C+j\infty} I(p) \hat{O}_{56}(p) a^{pt} dp. \quad (6)$$

Описанный алгоритм позволяет выделить полезную составляющую сигнала по нескольким начальным ударам импульсного источника и тем самым определить минимально необходимое число ударов.

Переход на трехслойную и многослойные модели принципиально описанный алгоритм не изменяет.

Для оценки отношения сигнал/шум по мощности достаточно измерить дисперсию шума на выходе сейсмоприемника перед началом ударного воздействия на грунт

$$P_{\sigma} = \sigma_{\sigma}^2 = \frac{1}{2\pi} N_{\sigma} (\omega_2 - \omega_1).$$

Здесь ω_2, ω_1 – граничные полосы частот наблюдаемого шума.

Отношение коэффициентов отражения R_2/R_1 определяется через отношение модулей сигналов на соответствующих временных задержках (t_2, t_1) ,

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{[U(t_2)]}{[U(t_1)]}. \quad (7)$$

На основании изложенного системного подхода в главе дается алгоритм оценки кратности СП, позволяющий определить наличие реверберационной помехи в комбинации с полезным сигналом, синтезировать ее временную функцию и, далее, вычесть этот вид СП из комбинации с полезным сигналом.

В разделе также уточнены динамические соотношения при формировании полезного сигнала в дальней зоне излучения.

Поскольку в известных автору литературных источниках и практике сейсморазведки нет четкого разграничения между регулярной и случайной составляющей синхронных помех (СП), обусловленных отражением сейсмических волн границ раздела не представляющих интереса с точки зрения поисковой геофизики, то представляется важным оценить потенциальную разрешающую способность или предельную дальность действия системы поиска через отношение сигнал/помеха по мощности. При этом под помехой понимается именно случайная составляющая СП, которая может быть определена через соотношение [8]:

$$\tilde{U}_{\Pi}(t) = \Delta\Lambda \left[\int_0^{\infty} I(t) \Phi_{\Gamma}(t-T) dt \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial \Lambda} \Phi_{\Pi}(\Lambda, t, \tau) d\tau \right], \quad (8)$$

где $\Delta\Lambda$ – среднеквадратическое значение случайного параметра сигнала, например амплитуды СП; $\hat{O}_i(\Lambda, t, \tau)$ – импульсная характеристика СП.

При существенном превышении СП над некоррелированными шумами, предельно допустимое отношение сигнал/СП по мощности можно записать в виде:

$$q = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \hat{O}_{\bar{n}}^2(\omega) d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \hat{O}_i^2(\omega) d\omega}. \quad (9)$$

Это означает, что предельное отношение сигнал/СП при указанных ограничениях не зависят от мощности зондирующего сигнала, а определяется лишь отношением энергий полезного сигнала и случайной составляющей СП в рабочей полосе частот $[\omega_1, \omega_2]$.

Уровень последней определяется, в первую очередь, геологическими неоднородностями верхней части разреза, параметры которых изменяются вдоль сейсмопрофиля случайным образом. Дисперсию и частотные свойства случайной составляющей СП можно оценить по форме и уровню первых вступлений сигнала на ранних времена задержки путем вычисления корреляционных функций СП вдоль сейсмопрофиля.

В третьей главе изложены основные теоретические материалы по оптимизации управления импульсными невзрывными источниками.

В результате использования известных в литературе решений вариационной задачи электроразведки, по максимизации отношения сигнал/СП плюс шум по мощности (Шайдуров Г.Я., 1999 г.), предложено аналогичное соотношение для задачи сейсморазведки.

Оптимальную форму ЗС можно представить в виде комбинации импульсных характеристик (ИХ) полезного сигнала (ПС) и СП:

$$I_{opt}(t) = \overline{\hat{O}_{\bar{n}}^*}(t) - \overline{\hat{O}_{\bar{i}}^*}(t) \frac{K_{c\bar{i}}}{1+\nu}, \quad (10)$$

где $\overline{\hat{O}_{\bar{n}}^*}(t) = \frac{\hat{O}_{\bar{n}}(t)}{R_0^{1/2}}$; $\overline{\hat{O}_{\bar{i}}^*}(t) = \frac{\hat{O}_{\bar{i}}(t)}{R_i^{1/2}}$ – нормированные зеркальные ИХ полезного сигнала (ПС) и СП.

$$R_0 = \int_0^{\tau_u} \hat{O}_{\bar{n}}^2(t) dt; R_i = \int_0^{\tau_u} \hat{O}_{\bar{i}}^2(t) dt.$$

$K_{c\bar{i}} = \int_0^{\tau_u} \hat{O}_{\bar{n}}(t) \hat{O}_{\bar{i}}(t-\tau) dt$ – нормированный коэффициент взаимной корреляции ПС и СП.

$$R_{c\bar{i}} = \int_0^{\tau_u} \hat{O}_{\bar{n}}(t) \hat{O}_{\bar{i}}(t-\tau) dt,$$

$$\nu = \frac{N_{\phi}}{C_i R_i Q} = \frac{Y_{\phi}}{Y_i},$$

$$\tilde{N}_i = \int_{t_i}^{t_j} \hat{O}_i^2(t) dt.$$

Предельно достижимое отношение С/СП + ш определяется как:

$$q = \frac{\nu_0}{\nu} = \frac{C_c R_0}{C_i R_i} = \frac{Y_{\bar{n}}}{Y_i}; C_c = \int_{t_i}^{t_j} \hat{O}_{\bar{n}}^2(t) dt. \quad (11)$$

На основе частного решения для ИХ ПС и СП в виде экспоненциально затухающего гармонического сигнала сделан важный вывод о целесообразности увеличения отношения сигнал/помеха+шум путем генерации источником первичной сейсмической волны на частоте ожидаемого полезного сигнала.

Предельное отношение С/СП+ш по мощности при оптимизации пары ЗС-примник определяется соотношением:

$$q_{opt} = \frac{T}{T_1(1+\nu)} \int_0^{\infty} \frac{\hat{O}_{\bar{n}}^2(j\omega)}{\hat{O}_{\bar{i}}^2(\omega)} d\omega. \quad (12)$$

При $\nu \ll 1$, т.е. в пренебрежении шумами, из (12) видно, что величина q_{opt} не зависит от мощности излучателя, а лишь от вида частотных характеристик полезных волн и СП.

Это безусловно относится к вибрационным источникам, для которых энергия излучаемого сигнала за время T много больше энергии импульсного источника

$$Y_{\hat{a}} = E_{\hat{a}} \dot{O} \quad Y_{\hat{e}} = E_{\hat{e}} \tau_u, \quad (13)$$

где P_B – мощность вибрационного источника; P_H – мощность импульсного источника; τ_u – длительность импульса.

Например, при средних значениях в переводе на силу удара $P_B=10$ т, $T=10$ с и $P_H=100$ т, $\tau_u=5$ мс, получаем $\mathcal{E}_B=100$ т·с, $\mathcal{E}_H=0,5$ т·с.

В то же время, по данным сравнительных полевых испытаний оба вида источника дают примерно одинаковые результаты по глубинности и отношению сигнал/помеха.

Этот парадокс объясняется необходимостью работы виброисточника при непрерывной работе вала отбора мощности и двигателя несущей машины (трактора, автомобиля), создающих мощный уровень акустических шумов, затрудняющих прием полезных сигналов.

Одним из методов достижения предельного отношения сигнал/помеха, исходя из соотношения (12), является максимизация отношения модулей энергетических спектра сигнала и СП

$$\frac{|\hat{O}_{\bar{n}}^2(\omega)|}{|\hat{O}_i^2(\omega)|} \rightarrow \max$$

при последовательном возбуждении группы импульсных источников с частотой повторения равной ω_c [8].

На рис. 4 показаны временная структура и спектры и пачки из пяти подобных импульсов.

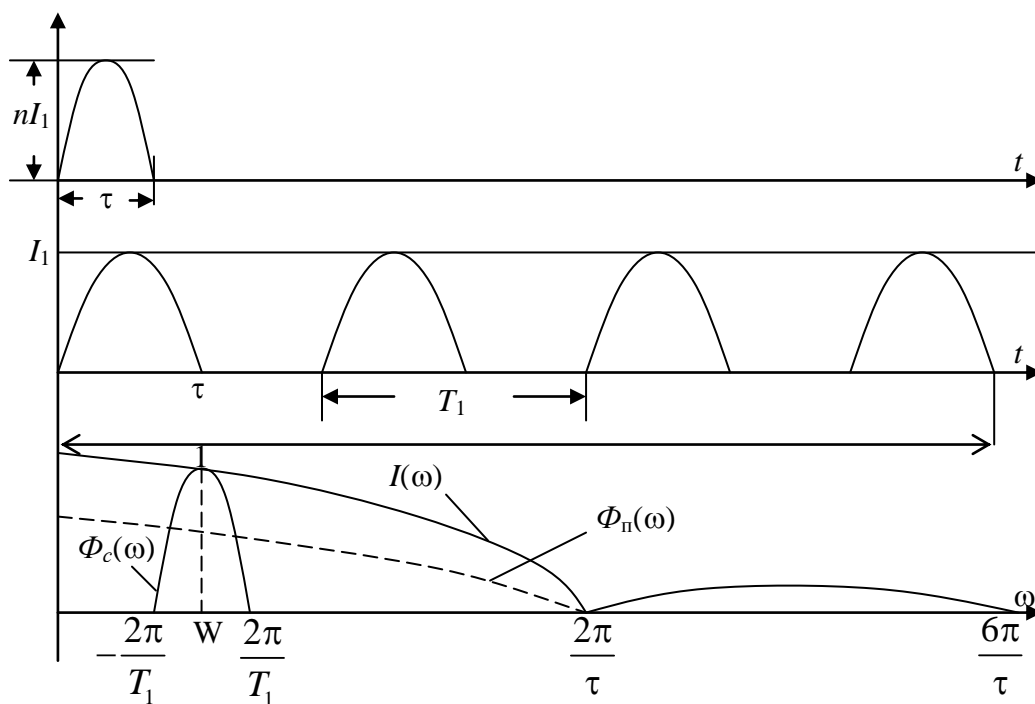


Рис.4. Временная структура и спектры одиночного сигнала и пачки из пяти импульсов

При повторении импульсов в пачке с периодом T_1 спектральная плотность мощности их концентрируется вокруг частоты ω_c с полосой частот $\Delta\omega_c = \pm \frac{2\pi}{T_1}$. В это же время одиночное (параллельное) возбуждения

импульсных источников длительностью τ дает ширину спектра одиночного импульса $\omega_2 - \omega_1 = \frac{2\pi}{\tau}$.

Выигрыш последовательного возбуждения в отношении сигнал/СП при n источниках в группе определяется как:

$$\frac{q_1}{q_2} \approx \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\Delta\omega_c} \approx \frac{1}{2} \frac{T_1}{\tau}. \quad (14)$$

При $T_1 = 2n\tau$, т.е. при скважности 2, $\frac{q_1}{q_2} \approx n$.

Таким образом, последовательное возбуждение источников, по сравнению с параллельным, дает энергетический выигрыш в отношении сигнал/СП по мощности пропорционально числу источников в группе.

Физически это означает, что возбуждение геологического разреза на ожидаемой частоте полезного сигнала позволяет не возбуждать весь спектр СП в полосе $(\omega_2 - \omega_1)$, а лишь в полосе полезного сигнала $2\Delta\omega_c$, тем самым более рационально использовать энергию источника и существенно уменьшить динамику по амплитуде наблюдаемой комбинации сигнала и СП. Последнее обстоятельство имеет важное значение для вторичной обработки сигналов на выходе сейсмоприемника, поскольку за счет нелинейности входного усилителя и параметрических искажений аналого-цифровом преобразователе, мощный сигнал СП, превышающий на десятки децибел полезный сигнал способен подавить последний. В диссертации этой проблеме посвящен специальный раздел.

Приведенные в работе количественные оценки показывают, что предельное отношение сигнал/СП+Ш может быть достигнуто как оптимизацией ЗС по этому критерию, так и оптимизацией передаточной характеристики приемника, однако в ряде задач, при высоком уровне СП, более целесообразно управлять формой импульса ЗС в виде (10), хотя техническая реализация этого метода безусловно сложнее, чем вторичная цифровая обработка сигналов в приемнике. Кроме того, методами математического моделирования спектров излучаемого сигнала в зависимости от числа импульсов в пачке и закона их следования. В частности показано, что при псевдослучайном законе следования сигнала приближается к белому шуму, что вполне соответствует классическим представлениям теории сигналов.

В приложении 1 представлена спектральная характеристика сигнала, осложненная вибрационным шумом работающего двигателя зарядного устройства источника на частотах 25, 30, 35 Гц.

Подавление этих помех возможно за счет псевдослучайного кодирования последовательности излучаемых сигналов и их свертке при вторичной обработке в приемнике. В этом случае сосредоточенные по спектру помехи переходят в разряд случайных и отношения сигнал/помеха на выходе приемника растет пропорционально числу импульсов с пачке. Однако, кардинальным методом исключения этого вида помех является

использование в качестве зарядного устройства аккумулятора с подзарядкой во время перехода генераторной группы на следующую точку зондирования.

В заключительном параграфе третьей главы рассмотрены особенности управления диаграммой направленности излучения группы источников путем соответствующей синхронизации управления их времени включения. Используются результаты подобных исследований проведенных украинскими геофизиками в 70-х годах (В.Я. Бендерский, Л.Д. Райхер, И.И. Хараз), однако с акцентом на возможности адаптивного управления, заложенными в схеме электронной синхронизации импульсных невзрывных источников класса «Енисей».

Исследованы возможности формирования продольной волны группы источников на частоте ожидаемого полезного сигнала методом подбора времени запаздывания при последовательном включении источников.

Зависимость времени запаздывания от расстояния между источниками в группе x глубины положение точки компенсации продольной волны h и распространение v_{op} предположение $x/h \ll 1$ определяется как:

для продольной волны

$$\Delta t_{ip} = \frac{1}{2} \frac{x^2}{h v_{ip}}, \quad (15)$$

для поперечной волны

$$\Delta t_{is} = \frac{h}{2v_{is}} \left[1 + \frac{x^2}{h^2} \right]. \quad (16)$$

Оценки показывают, что фазовая компенсация продольной волны в верхнем слое на глубине $h = 500$ м приводит к значительному ослаблению этой волны на больших глубинах (при $h = 4000$ м – в два раза). С учетом разности скоростей продольных и поперечных волн в два раза, в момент фазовой компенсации продольной волны, поперечная волна при этом усиливается.

Таким образом, в ряде поисковых задач, когда необходимо использовать информацию от поперечных волн методом подбора времени запаздывания включения источников в группе, можно формировать лишь поперечную волну.

В заключении 3-й главы рассмотрены возможности компенсации поверхностных волн за счет их интерференции при излучении группой источников.

Критерием подавления поверхностных волн, обеспечиваемым подбором пары управляющих параметров x и $t_{зап}$, является:

$$U_{\Sigma_n} = \left[\sum_{i=1}^{m_1} U_i^2 \right]^{1/2} \rightarrow \min, \quad (17)$$

где U_i – наблюдаемый сигнал от i -го источника в точке приема. Указанный критерий учитывает случайный характер фаз компенсируемых волн, распространяющихся вдоль поверхности неоднородного слоя.

Четвертая глава содержит материалы по аппаратурной реализации и экспериментальным результатам проведенных теоретических исследований.

Приводятся сравнительные данные ряда модификаций источника «Енисей»: СЭМ 100, СЭМ 100М, СЭМ 50, СЭМ 20, КЭМ-4, КЭМ 2.

Показано, что принципиальным отличием всех указанных источников от конструкций других производителей является запатентованный с участием диссертанта [1] принцип начального формирования ударного воздействия на грунт путем обеспечения движения пригруза по направлению, противоположному грунту (удар вверх), а затем с запаздыванием, определяемым линейной частью закона Гука, усилие передается в грунт через конструктивные элементы источника. Таким образом подбором трех управляющих факторов – направления движения пригруза, времени запаздывания удара на грунт и выбора площади опоры обеспечивается экологически мягкое воздействие на грунт без его разрушения.

В работе описаны новые подходы к совершенствованию конструкции источников «Енисей», в частности за счет введения адаптивного контроля за положением движущихся частей - зазора якоря, оперативной оценки ускорения движения в районе полоза и др. [5]. Приводятся алгоритмы управления минимальным числом ударов источника, повышающие производительность работ сейсморазведочного отряда.

Для обеспечения возможности работы источника при выключенном двигателе транспортной машины с участием диссертанта, осуществившим постановку задачи и основные принципиальные решения разработан нестандартный блок заряда накопительных емкостей источника от аккумуляторов емкостью 75-90 ампер-часов. Специфика проблемы заключается в импульсном характере нагрузки аккумуляторов не позволяющей производить их длительную эксплуатацию. Разработана двухступенчатая схема электронного управления зарядом, обеспечивающая стабильную работу зарядного устройства до 1200 единичных циклов заряд-разряд с одной подзарядкой аккумуляторов.

В заключительных параграфах четвертой главы приведены материалы полевых испытаний разработанных в диссертации алгоритмов и технических средств.

Первые испытания частотно-импульсного режима управления группой из трех источников «Енисей» типа КЭМ-4 были проведены в сентябре 2007 г в Богучанской георазведочной экспедиции в Красноярском крае.

В приложении 2 изображены фрагменты сейсмограмм при одновременном возбуждении георазреза тремя источниками А и последовательного с временами задержки запуска источников соответственно через 0, 50, 100 мс (Б). из сопоставления этих сейсмограмм видно, что последовательный режим возбуждает более глубокие поверхностные слои со смещением порядка 400 м и сдвигом по времени 200 мс при допущении скорости распространения волн 4000 м/с.

Фрагменты сейсмограмм для обоих режимов возбуждения с задержкой 40 мс, рассчитанной на выделение полезного сигнала с частотой 25 Гц, и

нерекурсивной вторичной обработкой цифровым фильтром приведены в приложении 3, 4.

Из записей видно, что фильтрация на задержке 40 и 50 мс на горизонтах с задержками сигналов 2200-2400 мс выделяет коррелированную отражающую границу, не видную в режиме параллельного возбуждения.

В приложении 5 приведены дополнительные примеры сейсмограмм для последовательного и одновременного возбуждения геореза тремя источниками.

Частотные характеристики этого эксперимента показаны в приложении 6. На этих сейсмограммах в подтверждение выводов гл. 3 четко виден положительный результат управления задержкой возбуждения группы источников: явное подавление низкоскоростных поверхностных волн, относящихся к классу синхронных помех.

Таким образом, последовательное возбуждение с ожидаемой частотой сигнала 25 Гц и последующей согласованной фильтрацией на этой частоте позволяет дополнительно дифференцировать разрез на глубине порядка 4,4-4,8 км.

Результаты полевых испытаний аккумуляторного возбуждения источников приведены в приложении 7.

Из сопоставления частотных характеристик видно, что работа от аккумуляторов подчеркивает информационную высокочастотную составляющую спектра сигналов выше 20 Гц. Можно сделать предварительное заключение в подтверждение выводов гл. 3 о подавлении слабых сигналов более мощными помехами вибраций от работающего двигателя на нелинейностях входных каскадов сеймостанции и стробоскопических эффектах преобразования аналогового сигнала в цифровой код в АЦП.

Проведенные под руководством автора сравнительные полевые испытания с погруженными в неглубокие скважины геофонами (Бендерский В.Я. 1973г.), показали возможность существенно снизить уровень микросейсм и звуковых волн. Этими же работами определено, что сгущение шага наблюдения до 10 м между каналами открывает в процессе обработки интерференционные системы с различными характеристиками, что благополучно сказывается на информативности сейсмических данных. Различные материалы по полевым испытаниям источников «Енисей» и путей их совершенствования приведены в [9-13].

Заключение

1. Импульсные невзрывные источники типа «Енисей» оптимально сочетают возможности адаптивного управления, снижения собственных вибрационных шумов, неразрушающего воздействия на грунт вследствие запаздывания ударного воздействия относительно пластической деформации грунта.

2. Предложен алгоритм оценки отношения полезный сигнал/шум по сигналам ближайших к источнику сейсмоприемников, позволяющий адаптивно управлять числом ударов.

3. Разработаны алгоритмы управления частот возбуждения группы источников, позволяющие поднять отношение сигнал/синхронная помеха и снизить требование к линейности амплитудной характеристики входного тракта сейсмоприемника.

4. Показано, что подбором времени синхронизации источников в группе возможно в верхних неоднородных слоях Земли минимизировать возбуждение поверхностных, кратных волн и другого типа синхронных помех.

5. Исследованы алгоритмы оптимизации пары «источник-приемник», показаны преимущества и недостатки того или иного типа оптимизации.

6. Разработано нестандартное устройство зарядки накопительных конденсаторов, обеспечивающего мягкий режим разрядного тока аккумуляторов при существенном импульсном характере нагрузки, вызываемом режимом заряд-разряд импульсного электромагнитного источника сейсмических колебаний.

7. Экспериментальными работами в полевых условиях подтверждены теоретические положения данного исследования.

8. В практику полевых работ ОАО «Енисейгеофизика» успешно внедрена методика снижения микросейсм за счет заглубления сейсмоприемников в небольшие скважины.

9. Предложены алгоритмы аппаратно-программной реализации разработанных методов адаптивного управления импульсными невзрывными источниками «Енисей» с минимально возможными изменениями в конструкции выпускаемых фирмой «Геотехника» (г. Минусинск) источников.

10. Предложена программа внедрения разработанных методов в практику полевых работ.

11. Даны сравнительные характеристики с вибрационными источниками.

12. Для минимизации числа ударов (гл. 2) разработаны алгоритмы адаптивного управления импульсным невзрывным источником, включающие режимы постепенного начального уплотнения грунта под опорной плитой за счет синхронизации импульсов индуктора с высокой частотой порядка 50 Гц с низким напряжением на конденсаторах 100-200 и определения порогового отношения сигнал/шум с помощью процедуры оценки полезной составляющей сигнала гл. 2 через преобразование Фурье ранних и поздних по времени вступления сигнала. Разработана структурная схема реализации указанного алгоритма на основе дополнительного микроконтроллера устанавливаемого на сейсмостанции и связанного через штатный радиоканал с источником сейсмического удара.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Патент 2171478 РФ, МКИ 7G01V 1/09. «Импульсный невзрывной сейсмоисточник с электромагнитным приводом» / Детков В.А., Ивашин В.В., Певчев В.П.; приоритет 23.02.00; опубл. 27.07.01, Бюл. № 21.
2. Свидетельство № 1581050 на изобретение: «Передвижной сейсмоисточник» / Нечуйвитер Л.И., Коденко М.Н., Лабунец Ю.И., Сибгатулин В.Г., Детков В.А. Приоритет изобретения 28.11.1988 г.
3. Положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2007149199/28 (053982) от 19.02.2009 «Способ невзрывного возбуждения продольных сейсмических волн» / Ёшкин В.Е., Детков В.А., Шайдуров В.Е.
4. Детков В.А. Почему геофизическая компания занялась созданием аппаратуры? / В.А. Детков // Приборы и системы разведочной геофизики.- Саратов: 2005.-№4.-с.6.
5. Детков В.А., Щадин П.Ю., Ивашин В.В. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники "Енисей": особенности технического решения и применения / В.А. Детков, П.Ю. Щадин, В.В. Ивашин// Приборы и системы разведочной геофизики.- Саратов: 2007.-№4.-с.
6. Детков В.А. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники "Енисей". Обзор моделей и опыт практического применения /В.А. Детков // Приборы и системы разведочной геофизики.- Саратов: 2007.-№4.-с.5.
7. Детков В.А., Шайдуров Г.Я. О возможности адаптивного управления импульсными невзрывными источниками // Приборы и системы разведочной геофизики. Саратовское отд. Евро-Азиатского геофизического общества (СО ЕАГО), г. Саратов, №4. С.14-16.
8. Детков В.А., Шайдуров Г.Я. Частотно-импульсный режим возбуждения сейсмических волн группой импульсных невзрывных источников. СО ЕАГО г. Саратов, №4, 2007. С.11-13.
9. Н.А.Горюнов, В.А.Вальчак, В.А.Детков, В.А.Щербаков. Эффективность применения невзрывной технологии при проведении регионально-поисковых сейсморазведочных работ повышенной кратности на северо-западе Сибирской платформы. СНИИГГиМС. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Новосибирск, 2006 г. - С. 221.
10. В.А.Детков, П.Ю.Щадин. Прогрессивные технологии - основа повышения эффективности сейсморазведочных работ на Сибирской платформе. СНИИГГиМС. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Новосибирск, 2006 г. - С.263.
11. А.А.Евграфов, В.И.Вальчак, В.А.Детков, В.А.Щербаков, Н.И.Бобров. Основные особенности строения платформенного чехла и консолидированной земной коры Сибирской платформы в районе

- опорного геофизического профиля «Алтай - Северная Земля» (3-СБ). СНИИГГиМС. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Новосибирск, 2006 г. - С.266.
12. Детков В.А., Щадин П.Ю., Струнов А.В., Сагитов Ф.В. Результаты полевых испытаний и выработки рекомендаций по оптимизации технологии проведения сейсморазведочных работ с использованием погружных геофонов. Саратовское отделение ЕАГО. Приборы и системы разведочной геофизики. Саратов. - 2007. - С.
 13. В.А. Детков, П.Ю. Щадин и др. Результаты работ с импульсными источниками в Восточной Сибири // Доклад на н.-т. семинаре п. Шира Красноярского края, август 2007.