



Ю. П. Кострыгин  
Д. А. Колесников

ООО "НОВОРОСМОРГЕО", НОВОРОССИЙСК  
ООО "НОВОРОСМОРГЕО", НОВОРОССИЙСК

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОДОИМПУЛЬСНОГО НАКАПЛИВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОПОЛЯРНЫХ КОДОВ ЛИЧ

**АННОТАЦИЯ.** В качестве наиболее значимой альтернативы вибросейсмическому методу следует рассматривать кодоимпульсный способ накопления сейсмических колебаний. В данной статье методом математического моделирования исследуются возможности повышения эффективности кодоимпульсного способа сейсмической разведки с использованием однополярных кодов ЛИЧ путём увеличения длительности и максимальной частоты следования импульсов в развёртке. Показано, что увеличение максимальной частоты следования импульсов  $F_{\max}$  при использовании однополярных развёрток ЛИЧ до 80 Гц и более создаёт принципиальные возможности для повышения временной разрешающей способности кодоимпульсного метода до уровня разрешающей способности вибросейсмического метода.

Очевидно, что основные перспективы невзрывной сейсморазведки прежде всего связаны с развитием способов, предполагающих возбуждение и регистрацию сложных сейсмических сигналов. Широкое применение в сейсморазведке получил способ с торговой маркой *Vibroseis*, использующий квазигармонические сложные сигналы. Эффективность данного метода определяется, как известно, высокой помехоустойчивостью по отношению к некогерентным помехам и возможностью гибкого варьирования спектром возбуждаемых колебаний. Вместе с тем себестоимость серийных гидравлических вибраторов, применяемых для возбуждения квазигармонических колебаний, достигает 500 - 700 тысяч долларов и более, что обуславливает для многих геофизических предприятий серьёзные экономические проблемы. В этой связи чрезвычайно актуальным становится вопрос о развитии и внедрении в производство кодоимпульсного метода сейсмической разведки, характеризующегося практически такой же помехоустойчивостью, как и вибросейсмический метод, однако использующего излучатели колебаний с существенно более низкой себестоимостью.

В нашей стране при реализации кодоимпульсного способа сейсмической разведки применялись и приме-

**ABSTRACT.** The code pulse seismic vibrations accumulator method should be considered the most significant alternative to vibroseis method. Potentials of enhancement of efficiency of the code pulse seismic prospecting with use of bi-phase codes with frequency ramp in the way of increasing time and maximum pulse-repetition frequency in scanning are studied in this article with the help of mathematical modelling method. As it is shown, the increase of maximum pulse-repetition frequency ( $F_{\max}$ ) with the use of unipolar scanning (frequency ramp) up to 80 Hz and more creates principle possibilities to increase temporary resolution ratio of the code pulse method up to the level of scanning capacity of vibroseis method.

няются однополярные коды с линейным изменением частоты следования импульсов (коды ЛИЧ). Временное положение  $n$ -го импульса в развёртке ЛИЧ, характеризующейся возрастанием частоты следования импульсов, определяется из выражения

$$t_n = (T / \Delta F) \left( \sqrt{F_n^2 + 2n\Delta F / T} - F_n \right), \quad (1)$$

где  $t_n$  - временное положение  $n$ -го импульса в развёртке (начальному импульсу присвоен номер "0");  $T$  - длительность развёртки;  $F_n$  - начальная частота в развёртке;  $\Delta F$  - ширина частотного диапазона развёртки.

Общее количество импульсов  $N$  в развёртке ЛИЧ определяется из выражения

$$N = [F_{\min} + \Delta F / 2] T, \quad (2)$$

где  $F_{\min}$  - минимальная частота развёртки.

В 80-е гг. прошлого столетия в нашей стране в больших объёмах были выполнены теоретические и экспериментальные исследования эффективности применения кодоимпульсных сигналов ЛИЧ при проведении сейсморазведочных работ [1, 2]. Однако при постанов-

ке таких исследований естественно учитывались методические и технические возможности на тот период времени. По этой причине максимальная частота следования импульсов в развёртках  $F_{\max}$  была ограничена 45 Гц, а максимальная длительность развёрток  $T = 9$  с.

С учётом указанных ограничений на основании выполненных исследований были, в частности, отмечены следующие особенности кодоимпульсных сигналов ЛИЧ:

- Наиболее перспективные кодоимпульсные посылки ЛИЧ характеризуются динамическим диапазоном корреляционного преобразования  $D(\tau)$  30 - 40 дБ. Наибольший практический интерес представляют развёртки, для которых нижняя частота следования импульсов не менее 10 Гц.
- Функции взаимной корреляции (ФВК) кодоимпульсных сигналов ЛИЧ включают интервалы с аномально высокими интенсивностями корреляционного фона. При этом с увеличением длительности посылки  $T$  указанные интервалы растягиваются и смещаются в сторону больших времён пропорционально  $T$ .
- Существует тенденция к уменьшению относительного уровня помех преобразования по мере смещения частотного диапазона развёрток ЛИЧ в высокочастотную область.

В настоящее время имеются принципиальные возможности увеличения  $F_{\max}$  электромеханических излучателей с 40 до 80 Гц, при этом отсутствуют какие-либо технические причины, не позволяющие увеличить длительность развёртки, например, до 20 - 30 с. Очевидно, что с учётом результатов ранее выполненных исследований и современного развития технических средств целесообразно оценить возможность снижения уровня корреляционного фона для однополярных сигналов ЛИЧ путём увеличения параметров  $F_{\max}$  и  $T$ .

На основании ранее проведённых исследований сделан также вывод о том, что при  $F_{\max} \leq 40 \dots 45$  Гц в кодоимпульсном методе, в отличие от виброрейсического, отсутствуют механизмы регулировки огибающей спектра. Действительно, комплексный спектр  $S_c(w)$  однополярного кодоимпульсного сигнала, состоящего из  $N$  импульсов несложно определить путём использования хорошо известной теоремы о спектре функции, заданной с некоторой временной задержкой

$$S_c(w) = S_{\text{имп}}(w) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-jw t_n) = S_{\text{имп}}(w) S_k(w), \quad (3)$$

где  $S_{\text{имп}}(w)$  - спектр единичного импульса, входящего в последовательность;  $S_k(w)$  - комплексный спектр функции кода.

В реальных ситуациях и при условии  $F_{\max} \leq 40 \dots 45$  Гц частотные интервалы эффективных значений для спектров  $S_{\text{имп}}(w)$  и  $S_k(w)$  будут практически идентичными, поэтому при таких условиях возможность регулировки формы амплитудного спектра фактически отсутствует. При увеличении  $F_{\max}$  следует ожидать расширения спектра функции кода  $S_k(w)$  в область верхних частот, а значит, и повышения спектральной плотности высоко-

частотных составляющих кодоимпульсного сигнала в частотной области существования единичных импульсов развёртки.

В статье рассмотрены результаты математического моделирования, проведённого с целью оценки возможности повышения эффективности применения однополярных кодов ЛИЧ путём существенного увеличения значений параметров  $T$  и  $F_{\max}$ . При моделировании длительность развёрток  $T$  изменялась от 10 до 30 с, максимальная частота следования импульсов  $F_{\max}$  - от 30 до 80 Гц. Минимальная частота следования импульсов  $F_{\min}$  равнялась 10 Гц. Кодоимпульсные последовательности были составлены из импульсов с колокольной огибающей; при этом соблюдалось условие  $\beta/f_{\text{вид}} = 1$ , где  $\beta$  - коэффициент затухания импульса;  $f_{\text{вид}}$  - видимая частота импульса. При моделировании использовались импульсы с видимой частотой 25, 35, 45 и 55 Гц.

Временное сжатие импульсных последовательностей  $X(t)$  осуществлялось путём корреляционной свёртки  $X(t) * K(-t)$ , где  $K(t)$  - функция кода последовательности. Такой вид корреляционной обработки по существу исключает операции умножения и поэтому называется способом суммирования.

Корреляционные функции импульсных последовательностей анализировались путём вычисления динамического диапазона корреляционного преобразования  $D(\tau)$  и амплитудного спектра главного максимума ФВК в окне  $\approx 200$  мс. Динамический диапазон преобразования рассчитывался по формуле

$$D(\tau) = 20 \lg A_{\max} / \sigma(\tau), \quad (4)$$

где  $A_{\max}$  - пиковая амплитуда главного максимума ФВК;  $\sigma(\tau)$  - среднеквадратичная амплитуда корреляционного фона во временном окне 0,5 с. На рис. 1 приведены амплитудные спектры главных максимумов ФВК последовательностей ЛИЧ при различных значениях видимой частоты единичных импульсов  $f_{\text{вид}}$  и  $F_{\max}$ .

Из рис. 1 следует, что при  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц и  $F_{\max} = 30$  Гц спектр ФВК характеризуется чрезвычайно острым резонансом на частоте 27 Гц и правой граничной частотой в области 31 - 34 Гц, что связано с соответствующим ограничением спектра функции кода. По мере увеличения  $F_{\max}$  наблюдается расширение спектра в область верхних частот, а начиная с  $F_{\max} = 50$  Гц спектр ФВК приобретает форму спектра единичного импульса. Дальнейшее повышение  $F_{\max}$  не приводит к изменению спектра ФВК. Незначительное смещение частоты максимума спектра ФВК вправо по отношению к  $f_{\text{вид}}$  связано с тем обстоятельством, что спектр функции кода ЛИЧ имеет некоторый наклон, обуславливающий равномерное увеличение спектральной плотности с ростом частоты.

При  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и  $F_{\max} = 30$  Гц спектр ФВК имеет весьма сложную форму и два экстремума, сформированные соответственно функцией кода и единичным импульсом на частотах 29 Гц и 40 Гц. С увеличением  $F_{\max}$  форма спектра ФВК становится более простой, а правая граничная частота смещается в область верхних

частот. Начиная с  $F_{\max} = 60$  Гц спектр ФВК приобретает симметричную форму, совпадающую с формой спектра единичного импульса. Дальнейшее повышение  $F_{\max}$  не приводит к изменению спектра ФВК.

Аналогичные зависимости между формой спектра ФВК и  $F_{\max}$  наблюдаются и для более высокочастотных единичных импульсов. Так, при  $f_{\text{вид}} = 45$  Гц спектр ФВК принимал форму спектра единичного импульса начиная с  $F_{\max} = 70$  Гц, а при  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц начиная с  $F_{\max} = 80$  Гц. Таким образом, условие, исключающее искажения спектральных характеристик единичных импульсов в развёртке в результате корреляционной обработки последовательностей ЛИЧ, можно сформулировать следующим образом:

$$F_{\max} \geq f_{\text{вид}} + 25 \text{ Гц.} \quad (5)$$

Очевидно также, что соблюдение условия (5) позволяет максимально повысить разрешающую способность кодоимпульсного метода с использованием развёрток ЛИЧ. Так, на рис. 2 представлены главные максимумы ФВК при различных значениях видимой частоты единичных импульсов  $f_{\text{вид}}$  и  $F_{\max}$ . Из рисунка следует, что выполнение условия (5) позволяет весьма существенно уменьшить длительность корреляционных импульсов и снизить уровень корреляционного фона в ближней зоне ФВК. В этом случае форма главных максимумов ФВК строго соответствует форме единичных импульсов в развёртке.

Таким образом, современный кодоимпульсный излучатель, в отличие от ранее выпускаемого излучателя

ИКИ-10/40, должен обеспечивать максимальную частоту следования импульсов в развёртке  $F_{\max}$  не менее 80 Гц. При таких параметрах излучателя возникает принципиальная возможность достигнуть при кодоимпульсном накоплении такой же разрешающей способности, как и при вибр Сейсмическом способе разведки.

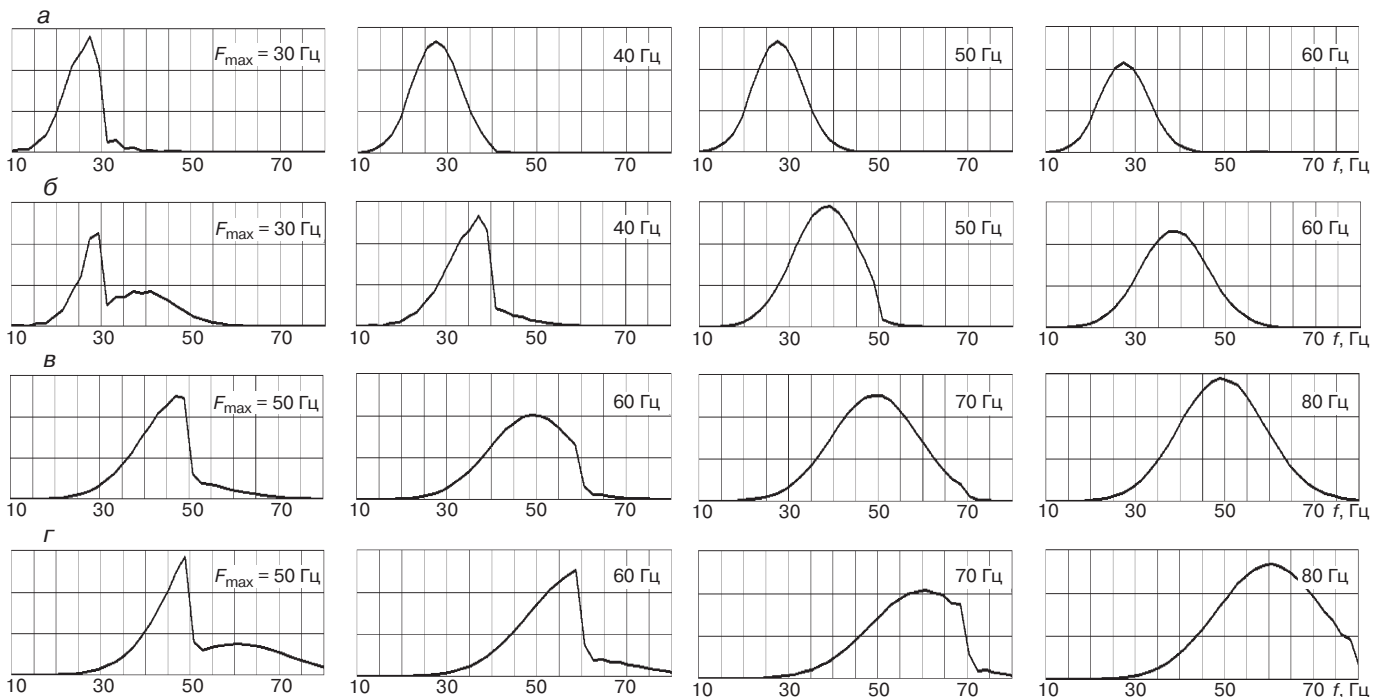
Вместе с тем увеличение  $F_{\max}$  при сохранении относительно малой длительности развёрток ЛИЧ приведёт к смещению интервалов ФВК с аномально высокой интенсивностью корреляционного фона в сторону меньших времён. Как известно, области повышенных значений корреляционного фона для импульсных последовательностей ЛИЧ формируются при временных сдвигах  $\tau$  между опорным и зарегистрированным сигналами, обеспечивающих совмещение интервалов развёртки с взаимно кратными частотами [1]. При этом начало разрастания амплитуд можно определить из выражения

$$\tau_n = [TF_{\min}(c-1)] / (F_{\max} - F_{\min}), \quad (6)$$

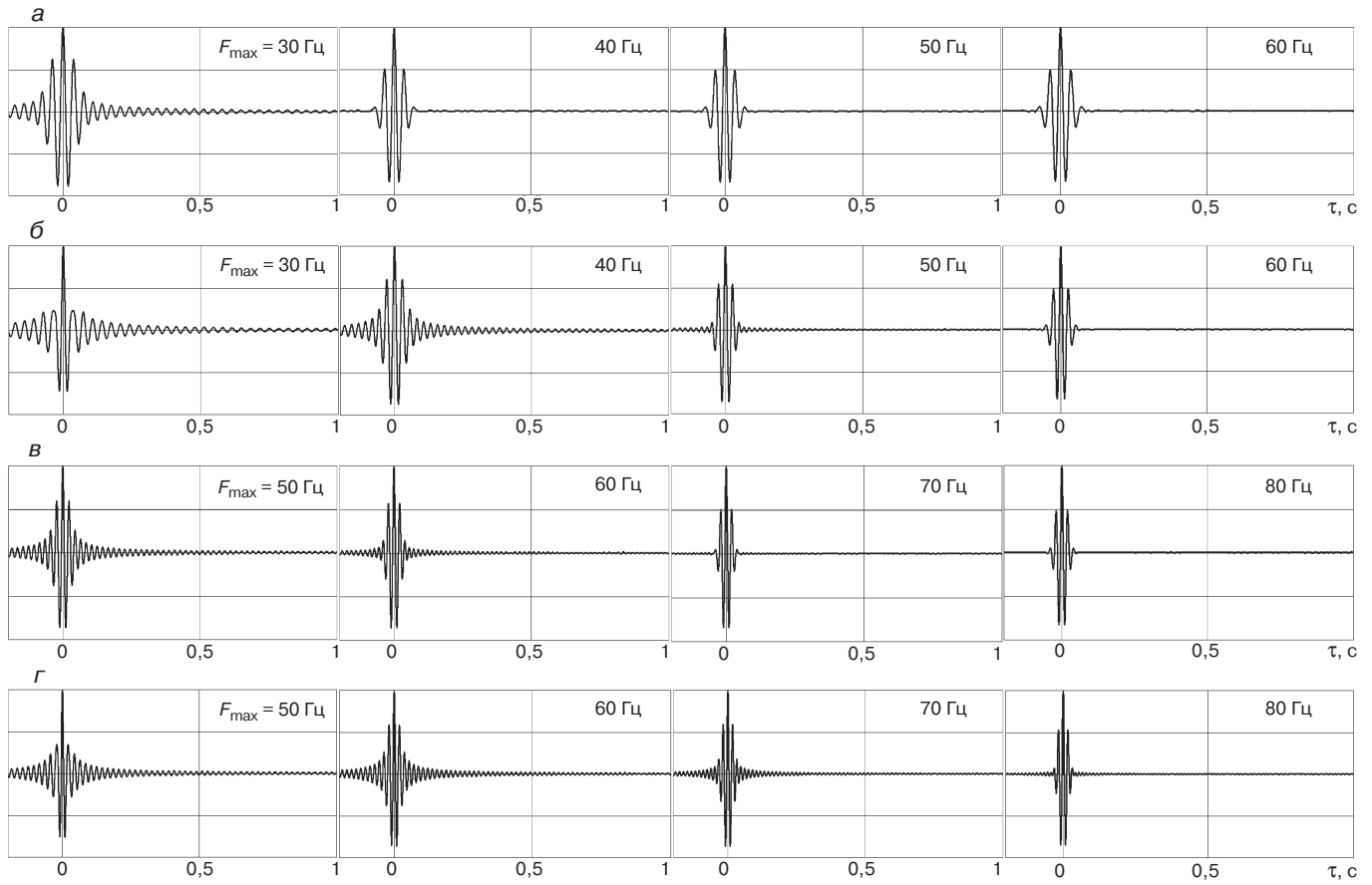
где  $c$  - кратность частот совмещаемых интервалов развёртки.

Из формулы (6) следует, что для того, чтобы исключить при повышенных значениях  $F_{\max}$  возможность смещения участков с аномально высоким уровнем корреляционного фона в область малых времён, необходимо соответственно увеличить длительность развёрток  $T$ .

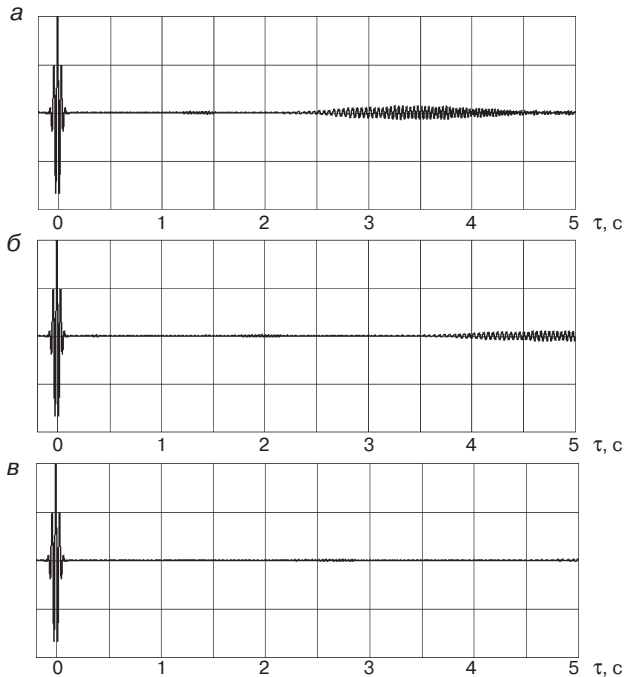
Пример, показывающий возможность смещения зон повышенной интенсивности корреляционного фона за пределы полезной записи путём увеличения  $T$ , приве-



**Рис. 1.** Зависимость формы спектра главного максимума ФВК кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ от  $F_{\max}$  и  $f_{\text{вид}}$ :  
а -  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц; б - 35 Гц; в - 45 Гц; г - 55 Гц



**Рис. 2.** Зависимость формы главного максимума ФVK последовательностей ЛИЧ от значений  $F_{\max}$  и  $f_{\text{вид}}$ :  
 а -  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц; б - 35 Гц; в - 45 Гц; г - 55 Гц

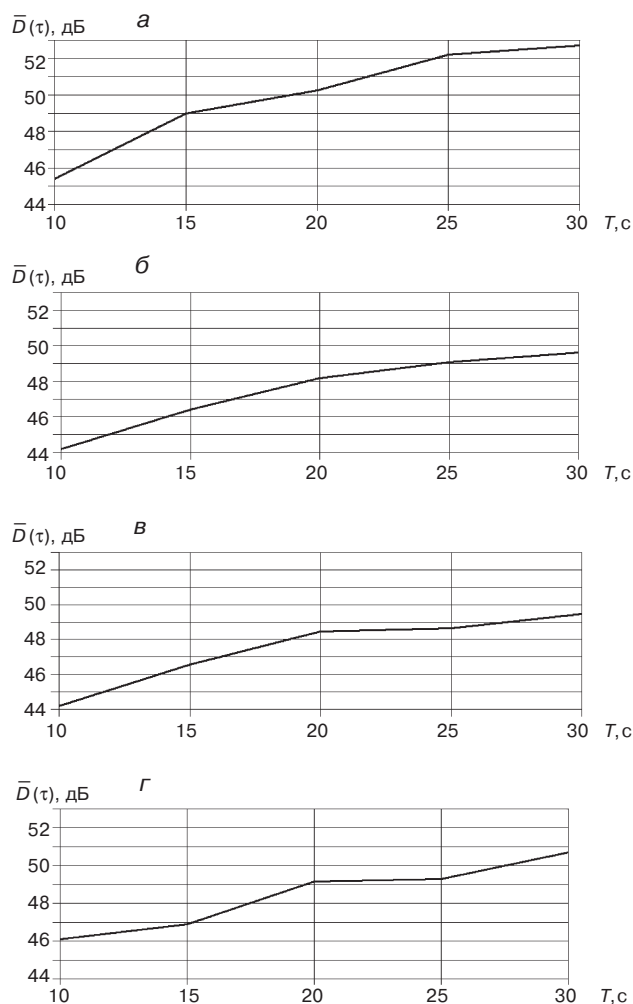


**Рис. 3.** ФVK последовательностей ЛИЧ при различных значениях  $T$  ( $f_{\text{вид}} = 25$  Гц;  $\Delta f$  10 - 50 Гц):  
 а -  $T = 10$  с; б -  $T = 15$  с; в -  $T = 20$  с

дён на рис. 3. В конкретном случае наиболее интенсивные компоненты корреляционного фона смещаются на времена  $\tau \geq 5$  с при  $T = 20$  с. Для более высокочастотных единичных импульсов, требующих соответственно и более высоких значений  $F_{\max}$ , существует необходимость дополнительного увеличения  $T$  в соответствие с формулой (6).

Вместе с тем в результате проведённого моделирования показано, что использование более протяжённых развёрток ЛИЧ позволяет не только вывести из интервала полезной записи разрастания корреляционного фона, но и несколько ослабить помехи преобразования, расположенные левее амплитудных разрастаний. Так, на рис. 4 приведены графики средних значений динамического диапазона преобразования  $\bar{D}(\tau)$  в зависимости от  $T$ . В данном случае значения  $\bar{D}(\tau)$  определялись в окнах  $(0,5 \text{ с} - \tau_H)$ . Из рис. 4 видно, что, например, при увеличении  $T$  от 10 до 30 с средний уровень корреляционного фона для участков, свободных от амплитудных разрастаний, уменьшался на 7,2 дБ при  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц и  $F_{\max} = 50$  Гц; на 5,46 дБ при  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и  $F_{\max} = 60$  Гц; на 5,28 дБ при  $f_{\text{вид}} = 45$  Гц и  $F_{\max} = 70$  Гц и на 4,6 дБ при  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц и  $F_{\max} = 80$  Гц.

Таким образом, при оптимальном выборе  $F_{\max}$  для кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ длительно-



**Рис. 4.** Средние значения  $\bar{D}(t)$  в интервале от 0,5 с до  $t_H$  в зависимости от  $T$ :

а -  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц,  $\Delta F$  10 - 50 Гц; б -  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц,  $\Delta F$  10 - 60 Гц;  
 в -  $f_{\text{вид}} = 45$  Гц,  $\Delta F$  10 - 70 Гц; г -  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц,  $\Delta F$  10 - 80 Гц

сти развёрток в большинстве реальных ситуаций целесообразно выбирать равными 20 - 30 с.

Указывая на необходимость увеличения длительности  $T$  при работе с высокочастотными ЛЧМ-развёртками, отметим, что это обстоятельство не приведёт к снижению производительности полевых наблюдений,

так как конечная эффективность подавления случайных помех в кодоимпульсном методе, как и в вибросейсмическом, зависит от суммарного времени воздействия на грунт. Поэтому при увеличении параметра  $T$ , с целью снижения корреляционного фона в интервалах регистрации полезных отражений, следует пропорционально уменьшать кратность статистического накопления, что не позволит снизить производительность работ. Более того, с точки зрения производительности использовать развёртки повышенной длительности выгоднее, так как в этом случае уменьшается общее время пауз между возбуждениями накапливаемых последовательностей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Увеличение максимальной частоты следования импульсов  $F_{\text{max}}$  при использовании однополярных развёрток ЛИЧ до 80 Гц и более создаёт принципиальные возможности для повышения временной разрешающей способности кодоимпульсного метода до уровня разрешающей способности вибросейсмического метода.

2. Условие (5) следует рассматривать как необходимое условие, исключающее искажения спектральных характеристик импульсов последовательности в результате корреляционной обработки и обеспечивающее идентичность формы главных максимумов ФВК и единичных импульсов в развёртке ЛИЧ.

3. В качестве обязательного условия эффективного использования высокочастотных развёрток ЛИЧ следует рассматривать необходимость увеличения длительности развёрток до 20 - 30 с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кострыгин Ю. П., 1988, Выбор параметров однополярных кодов при кодоимпульсном накоплении сейсмических сигналов: Исследование и разработка наземных невзрывных источников сейсмических колебаний: М., Геол. фонд РСФСР, 55 - 64.
2. Кострыгин Ю. П., Молоканов Г. И., 1980, Модельные исследования формы сейсмического сигнала при кодоимпульсном возбуждении: Разведочная геофизика, **89**, 38 - 47.

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Юрий Петрович КОСТРЫГИН - генеральный директор ООО "Новоросморгео", доктор техн. наук. E-mail: kost\_r@mail.ru

Дмитрий Алексеевич КОЛЕСНИКОВ - инженер-геофизик ООО "Новоросморгео".