

В качестве наиболее значимой альтернативы вибросейсмическому методу следует рассматривать кодоимпульсный способ накопления сейсмических колебаний. В данной части статьи выполнена оценка оптимальных значений параметров однополярных кодоимпульсных сейсмических сигналов ЛИЧ и ЛИП. 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. Наиболее эффективные последовательности ЛИП формируются при $F_{\max} = 30 \div 40$ Гц.

Исследование возможностей кодоимпульсного метода сейсмической разведки

Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А., ООО «Новоросморгео», г. Новороссийск

Часть 1. Выбор однополярных кодов

В настоящее время наибольшее применение в невзрывной сейсморазведке получил вибросейсмический метод, использующий гармонические сигналы с изменяющейся частотой. Технология, лежащая в основе такого метода, как правило, обеспечивает высокую геологическую эффективность сейсмических исследований. Однако стоимость сейсмических вибраторов в настоящее время составляет от 500-700 тысяч долларов до миллиона, что создаёт серьёзные экономические проблемы для геофизических организаций. По этой причине в последние годы усилился интерес к использованию в сейсморазведке кодоимпульсных сигналов, т.е. сложных сигналов, представляющих собой последовательности импульсов, следующих в соответствии с заданным кодом. Помехоустойчивость кодоимпульсного метода не уступает помехоустойчивости вибросейсмического метода, вместе с тем, стоимость кодоимпульсных излучателей в 2-4 раза меньше стоимости сейсмических вибраторов.

В данной статье обсуждаются результаты исследований, позволяющие повысить геологическую эффективность кодоимпульсной модификации сейсмической разведки до уровня вибросейсмического метода.

Оценка эффективности и выбор параметров кодоимпульсных последовательностей с линейным изменением частоты следования импульсов (коды ЛИЧ)

При кодоимпульсном возбуждении сейсмических колебаний достаточно важным моментом является вопрос о выборе эффективных кодов. Значительный интерес представляют однополярные последовательности с линейным

изменением во времени частоты следования импульсов (коды ЛИЧ) [2].

Для развёрток ЛИЧ с начальной и конечной частотами следования импульсов F_n и F_k при длительности развёртки T справедливо равенство (1), определяющее общее количество импульсов в развёртках

$$N = [(F_n + F_k) / 2] T \quad (1)$$

По аналогии с равенством (1) можно составить равенство (2):

$$n = [(F_n + F(t)) / 2] t, \quad (2)$$

где n – номер импульса, t – текущее время.

Вместе с тем, частоту следования импульсов в момент времени t можно определить следующим образом:

$$F(t) = F_n + (\Delta F / T) t \quad (3)$$

где ΔF – ширина частотного диапазона развёртки.

Подставляя $F(t)$ из равенства (3) в равенство (2) получим квадратное уравнение (4).

$$(\Delta F / 2T)^2 t^2 + F_n t - n = 0 \quad (4)$$

$$t_n = (T / \Delta F) \left(\sqrt{F_n^2 + 2n \Delta F / T} - F_n \right), \quad (5)$$

где t_n – временное положение n -го импульса в развёртке (начальному импульсу присвоен номер «0»).

Рассмотрим вопрос о необходимых значениях максимальной частоты следования импульсов в развёртках ЛИЧ. Для разработчиков кодоимпульсных излучателей это наиболее важный параметр, т.к. обеспечить относительно высокие значения частоты следования импульсов в развёртках технически крайне сложно. Так, на рис. 1 приведены, рассчитанные путём математического моделирования, амплитудные спектры главных максимумов функций взаимной корреляции (ФВК) последовательностей ЛИЧ при различных значениях видимой частоты единичных

импульсов $f_{\text{вид}}$ и максимальной частоты следования импульсов F_{max} . Для понижения результатов моделирования мы должны помнить о том, что комплексный спектр импульсной последовательности, а значит и спектр корреляционных импульсов, определяется произведением комплексных спектров функции кода и единичного импульса в развёртке. Т.е. спектр, а значит и форма корреляционных импульсов, зависит не только от спектра единичных импульсов, но и от вида функции кода [2].

При моделировании F_{max} изменялась от 30 Гц до 80 Гц. Минимальная частота следования импульсов F_{min} равнялась 10 Гц. Кодоимпульсные последовательности были составлены из импульсов с колокольной огибающей, т.е.

$$f(t) = \exp(-\beta^2 t^2) \cos(2\pi f_{\text{вио}} t), \quad (6)$$

При этом соблюдалось условие $\beta/f_{\text{вид}} = 1$, где β – коэффициент затухания импульса. Использовались импульсы с видимой частотой 25 Гц, 35 Гц, 45 Гц 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.

Анализ корреляционных функций импульсных последовательностей осуществлялся путём вычисления динамического диапазона корреляционного

преобразования $D(\tau)$ и амплитудного спектра главного максимума ФВК в окне ≈ 200 мс. Динамический диапазон преобразования, определяющий относительный уровень пиковой амплитуды главного максимума ФВК по сравнению с уровнем помех корреляционного преобразования, рассчитывался по формуле

$$D(\tau) = 20 \lg A_{\text{max}} / \sigma(\tau), \quad (7)$$

где A_{max} – пиковая амплитуда главного максимума ФВК; $\sigma(\tau)$ – среднеквадратичная амплитуда корреляционного фона во временном окне 0,5 с.

Из рис. 1 следует, что при $f_{\text{вид}} = 25$ Гц и $F_{\text{max}} = 30$ 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 $F_{\text{max}} = 50$ 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 $F_{\text{max}} = 30$ Гц спектр ФВК имеет весьма сложную форму и

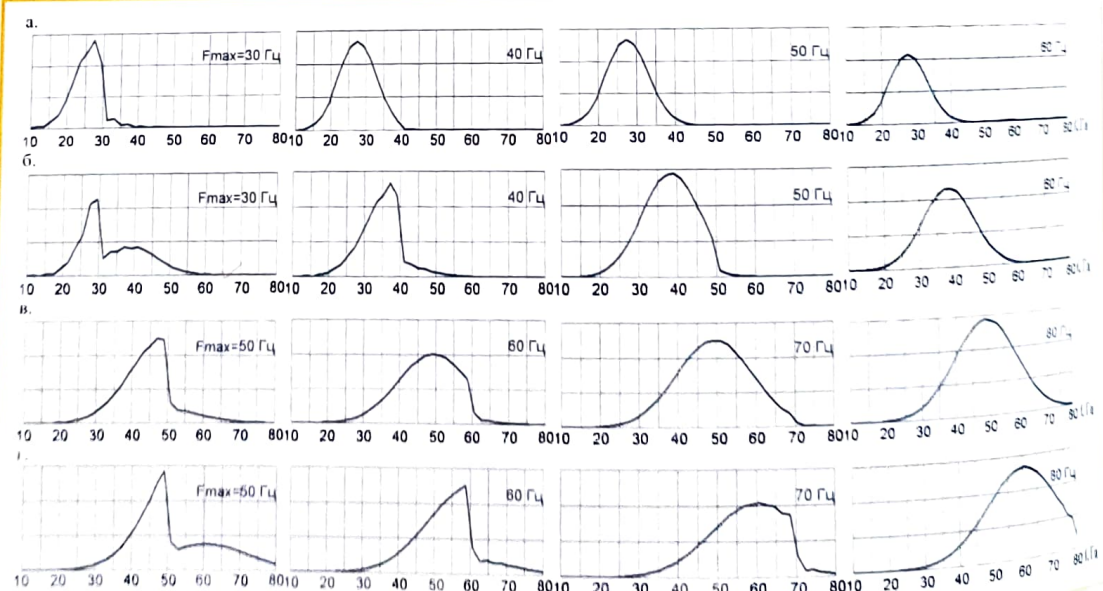


Рис. 1. Зависимость формы спектра главного максимума ФВК кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ от F_{max} и $f_{\text{вид}}$.
а - $f_{\text{вид}} = 25$ Гц; б - 35 Гц; в - 45 Гц; г - 55 Гц

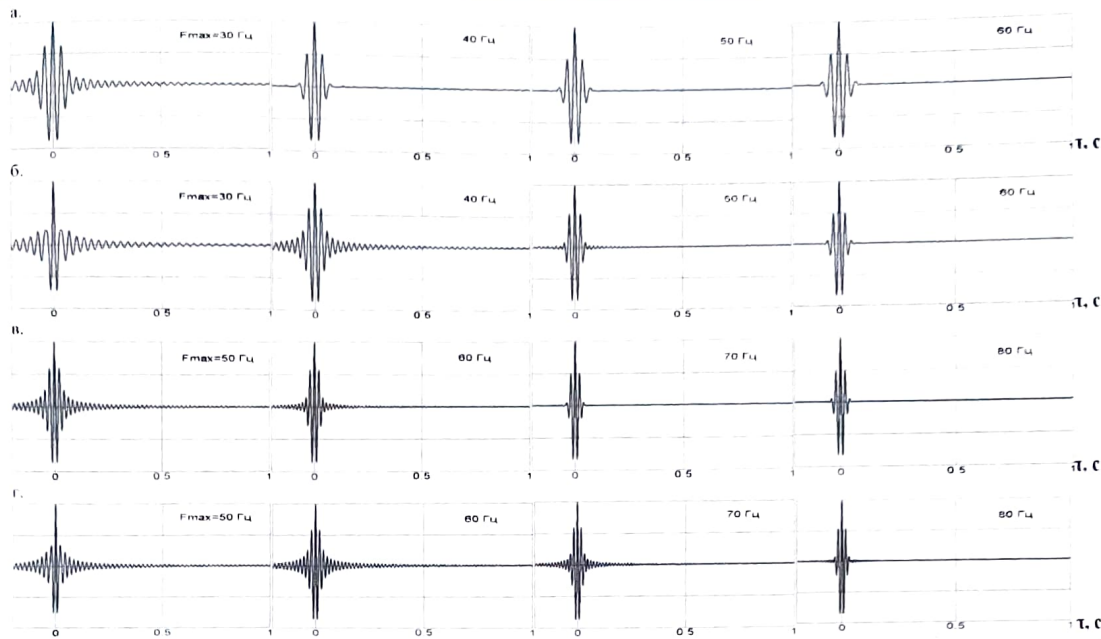


Рис. 2. Зависимость формы главного максимума ФВК последовательностей ЛИЧ от значений $F_{\max}$ и $f_{\text{вид}}$.

а - $f_{\text{вид}} = 25$ Гц; б - 35 Гц; в - 45 Гц; г - 55 Гц

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, при решении большинства практических задач условие, исключающее искажения спектральных характеристик единичных импульсов в развёртке в результате корреляционной обработки последовательностей ЛИЧ, можно сформулировать следующим образом:

$$F_{\max} \geq f_{\text{вид}} + 25 \text{ Гц} \quad (8)$$

Очевидно также, что соблюдение условия (8) 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 (8) 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, с учётом амплитудных спектров для реальных сейсмических записей современный кодоимпульсный излучатель при работе с однополярными развёртками ЛИЧ должен обеспечивать максимальную частоту следования импульсов в развёртке $F_{\max}$ не менее 80 Гц. При таких параметрах излучателя кодоимпульсный метод обеспечивает такую же разрешающую способность, как и вибросейсмический метод, т.к. корреляционные импульсы в этом случае приближаются по своей форме к совокупной импульсной реакции геологической среды и колебательной системы излучатель-грунт.

Помимо значений частотного диапазона весьма важным параметром при задании последовательностей ЛИЧ является длительность развёрток T . Этот параметр, во-первых, определяет помехоустойчивость метода, т.к. от него зависит количество импульсов в развёртке, и, во-вторых, временное положение амплитудных аномалий корреляционного фона на коррелограммах. Так,

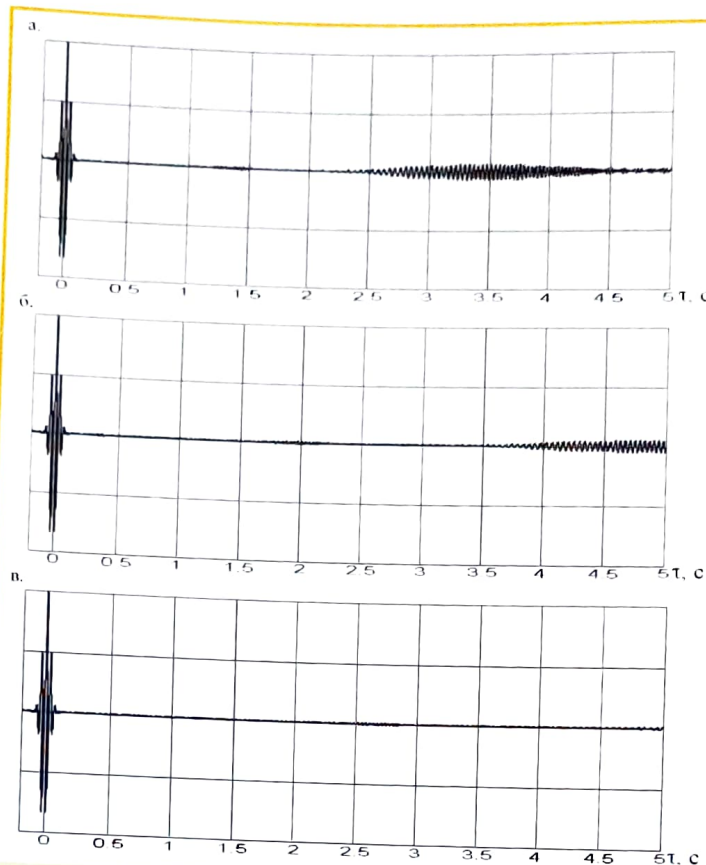


Рис. 3. ФВК последовательностей ЛИЧ при различных значениях T ($f_{\text{вид}} = 25$ Гц; $\Delta F = 10-50$ Гц), а - $T=10$ с; б - $T=15$ с; в - $T=20$ с.

при корреляционной обработке импульсных последовательностей ЛИЧ на коррелограммах формируются области протяжённостью 1-2 с, характеризующиеся повышенными значениями амплитуд корреляционного фона. Области повышенных значений корреляционного фона для импульсных последовательностей ЛИЧ формируются при временных сдвигах τ между опорным и зарегистрированным сигналами, обеспечивающих совмещение интервалов развёртки с взаимно кратными частотами [2]. Таким образом, для того чтобы определить начало разрастаний корреляционного фона τ_n для развёрток ЛИЧ, необходимо определить времена развёртки, для которых частоты следования кратны минимальной частоте $F_{\min}$. Для этого составим следующее уравнение

$$F_{\min} \cdot c = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) / T \cdot \tau_n, \quad (9)$$

Здесь c – кратность частот совмещаемых интервалов развёртки.

Из уравнения (9) можно определить времена начала разрастаний для ФВК последовательностей ЛИЧ:

$$\tau_n = [T \cdot F_{\min}(c - 1)] / (F_{\max} - F_{\min}), \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что для того чтобы сместить за пределы полезной записи участки с аномально высоким уровнем корреляционного фона, необходимо соответственно увеличить длительность развёрток T .

Пример, показывающий возможность смещения зон повышенной интенсивности корреляционного фона за пределы полезной записи путём увеличения T , приведён 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, более высоких значений $F_{\max}$, существует необходимость дополнительного увеличения T в соответствии с формулой (10).

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

производительности полевых наблюдений, т.к. конечная эффективность подавления случайных помех в кодоимпульсном методе, так же как и в виброрейсмическом методе, зависит от суммарного времени воздействия на грунт [2]. 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, т.к. в этом случае уменьшается общее время пауз между возбуждениями накапливаемых последовательностей.

Сравнительный анализ эффективности кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний при использовании однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП

Наряду с кодами ЛИЧ значительный интерес при кодоимпульсном накоплении сейсмических колебаний представляют однополярные коды с линей-

ным изменением периода следования импульсов (коды ЛИП) [3]. Такие коды выгодно отличаются от кодов ЛИЧ более равномерным распределением помех корреляционного преобразования и отсутствием интервалов с аномально высокими значениями корреляционного фона, либо их значительным смещением на 1-1,5 с, в область больших времён [2].

Величина периода следования импульсов T_n в развёртке ЛИП определяется условием

$$T_n = T_0 - \Delta T(n-1), \quad (11)$$

где T_0 – начальный период следования импульсов; ΔT – приращение периода следования импульсов; n – номер импульса в развёртке.

Используя формулу суммы членов арифметической прогрессии и полагая, что начальному импульсу присвоен номер «0», можно определить относительное запаздывание t_n для n -го импульса в развёртке ЛИП, т.е. функцию кода последовательности

$$t_n = nT_0 - n(n-1)\Delta T/2 \quad (12)$$

Очевидно, что по аналогии с вибросейсмическим методом, режимы работы кодоимпульсного излучателя следует задавать с использованием физически наиболее значимых параметров, реально определяющих эффективность метода и технические возможности излучателя. К таким параметрам можно отнести конечную (максимальную) частоту следования импульсов в развёртке $F_{\max}$, длительность развёртки T и число импульсов N в развёртке.

Указывая на практическую целесообразность задания последовательности ЛИП с использованием параметров $F_{\max}$, T и N , следует вместе с тем отметить, что в формуле (12), определяющей функцию кода развёртки ЛИП, параметры $F_{\max}$, T и N отсутствуют. Поэтому существует необходимость задания значений $F_{\max}$, T и N через соответствующие им значения параметров T_0 и ΔT .

Запишем систему уравнений

$$T_0 - (N-1)\Delta T = T / F_{\max} \quad (13)$$

$$NT_0 - [N(N-1) \Delta T] / 2 = T \quad (14)$$

Данная система уравнений позволяет по известным параметрам $F_{\max}$, T и N определить параметры T_0 и ΔT .

На основании сопоставления эффективности кодов ЛИЧ и ЛИП, выполненных на начальной стадии развития кодоимпульсного метода, было показано, что в ряде случаев развёртки ЛИП

обеспечивают более высокую эффективность кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний, что, как уже отмечалось, в первую очередь связано с более равномерным распределением помех корреляционного преобразования [2]. Вместе с тем было также отмечено, что в отличие от кодов ЛИЧ для кодов ЛИП значительно более сложно сформулировать правила, на основании которых можно было бы осуществлять выбор наиболее эффективных кодов. Чтобы облегчить задачу выбора кодов ЛИП, приведём таблицу эффективных кодов ЛИП, под которыми будем понимать такие коды, при использовании которых $\tau_{\text{эф}} \leq 2/f_{\text{вид}}$. Под эффективной длительностью корреляционных импульсов $\tau_{\text{эф}}$, в данном случае понимаются отрезки ФВК, в которых сосредоточено 85% энергии корреляционной функции, рассчитанной в интервале $-2 \text{ с} \leq \tau \leq +2 \text{ с}$. В таблице 1 эффективные коды отмечены жирным шрифтом.

Таблица 1: Эффективные коды ЛИП

Параметры последовательностей		$F_{\max}$, Гц					
T , с	$f_{\text{вид}}$, Гц	30	40	50	60	70	80
10	25	1,82	2,00	2,85	4,37	5,90	7,67
	35	1,22	1,99	1,29	1,55	2,20	3,04
	45	1,71	1,89	2,12	1,71	1,31	1,36
	55	1,81	1,59	1,98	2,14	1,87	1,26
20	25	1,77	2,00	2,85	4,40	6,05	8,27
	35	1,22	1,99	1,29	1,55	2,17	3,01
	45	1,71	1,89	2,12	1,71	1,31	1,36
	55	1,92	1,59	1,98	2,14	1,87	1,26
30	25	1,73	2,00	2,85	4,37	6,10	8,40
	35	1,19	1,99	1,29	1,55	2,20	2,97
	45	1,71	1,89	2,12	1,67	1,31	1,35
	55	1,81	1,59	1,98	2,14	1,87	1,26

Примечание. Числами в таблице показаны значения эффективной длительности главных максимумов ФВК $\tau_{\text{эф}}$, отнесённые к преобладающему периоду колебаний.

Из таблицы 1 следует, что при любом значении $F_{\max}$ можно назвать не менее 2-х значений $f_{\text{вид}}$ импульса, при котором ФВК последовательности будет иметь достаточно качественную динамику. Однако очевидно, что на сейсмограммах обычно присутствуют импульсы с различной преобладающей частотой

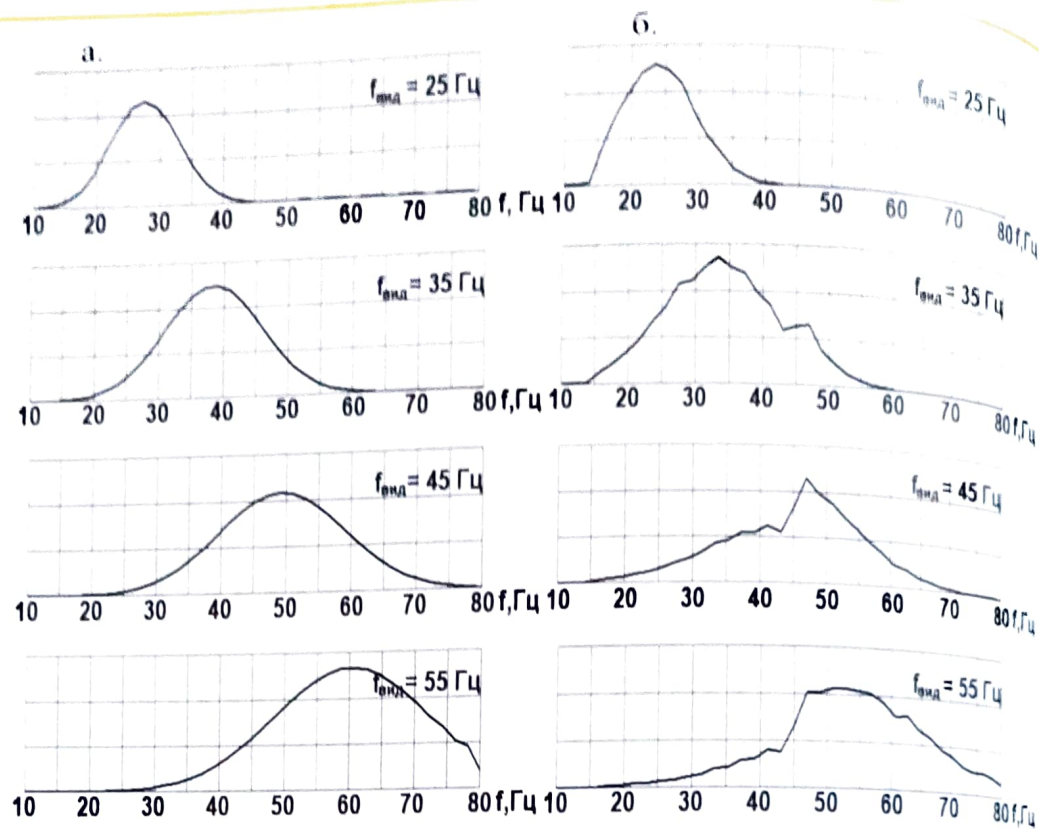


Рис. 4. Сопоставление спектров главных максимумов ФВК наиболее эффективных последовательностей ЛИЧ и ЛИП ($T=30$ с)
а – ЛИЧ ($F_{\max} = 80$ Гц); б – ЛИП ($F_{\max} = 30$ Гц)

колебаний. Поэтому выбранные значения $F_{\max}$ последовательностей ЛИП должны обеспечивать необходимую динамику корреляционных функций для широкого диапазона $f_{\text{вид}}$. Такому условию соответствуют последовательности ЛИП при $F_{\max} = 30-40$ Гц (см. таблицу 1). Поэтому последовательности ЛИП, являющиеся наиболее эффективными для использования в нефтегазовой сейсморазведке, формируются при $F_{\max} = 30-40$ Гц.

На рис. 4 сопоставлены спектры главных максимумов ФВК эффективных последовательностей ЛИЧ и ЛИП. Из рисунка видно, что спектры последовательностей ЛИП с некоторым приближением аппроксимируют аналогичные спектры ЛИЧ. Это даёт основание предполагать, что эффективные последовательности ЛИП и ЛИЧ будут характеризоваться достаточно близкой динамикой корреляционных импульсов.

Корреляционные функции эффективных последовательностей ЛИЧ ($F_{\max} = 80$ Гц) и эффективных последовательностей ЛИП ($F_{\max} = 30$ Гц), рассчитанные при различных значениях $f_{\text{вид}}$, сопо-

ставлены на рис. 5. Из рисунка можно видеть, что главные максимумы ФВК соответствующие эффективным кодам ЛИЧ и ЛИП, несущественно отличаются друг от друга по форме колебаний при одинаковых значениях $f_{\text{вид}}$, что подтверждается количественными оценками параметра $\tau_{\text{эф}}$. Столь незначительные различия между корреляционными импульсами эффективных последовательностей ЛИЧ и ЛИП практически не могут повлиять на результативность сейсморазведочных работ. Вместе с тем, в дальней зоне корреляционных функций уровень помех преобразования для последовательностей ЛИП существенно ниже, чем для последовательностей ЛИЧ, что в принципе позволяет получать более качественные сейсмические материалы при работе с развёртками ЛИП в условиях, характеризующихся повышенным динамическим диапазоном сейсмических записей. По сравнению с кодами ЛИЧ изменение кодов ЛИП позволяет снизить уровень корреляционного фона на 4–7 дБ при $\tau = 2$ с; на 4–11 дБ при $\tau = 3$ с; на 7–13 дБ при $\tau = 4$ с и на 10–24 дБ при $\tau = 5$ с.

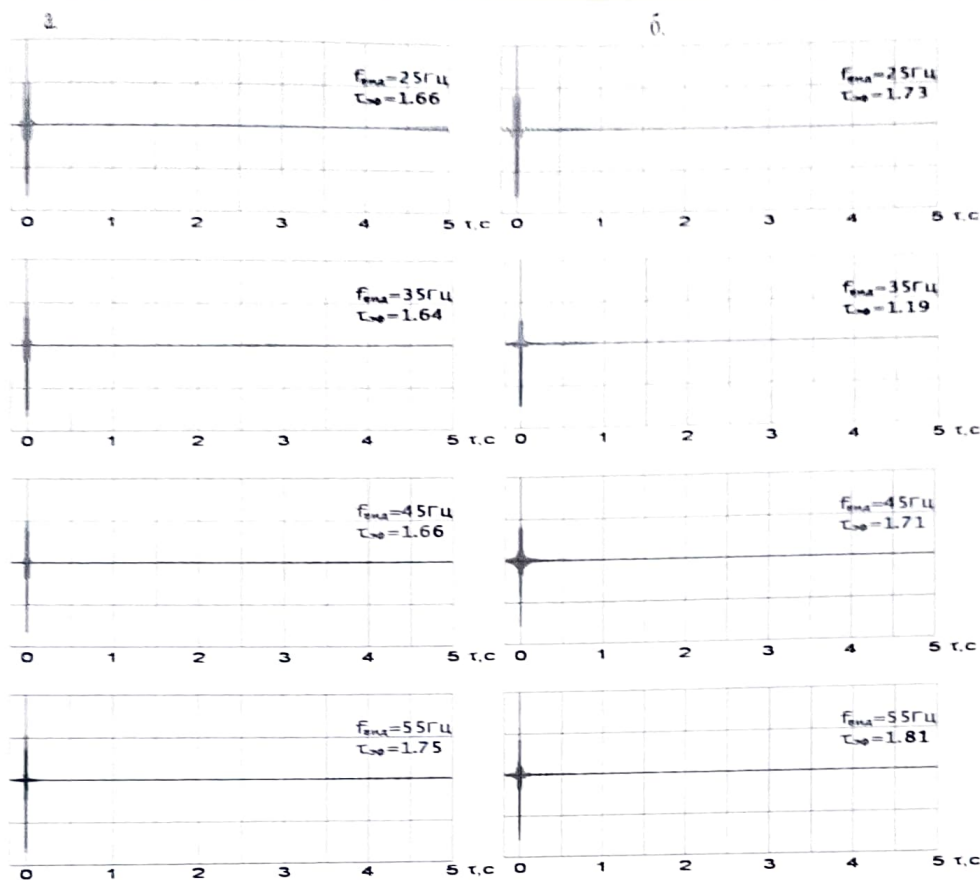


Рис. 5. Сопоставление ФВК наиболее эффективных последовательностей ЛИЧ и ЛИП ($T=30$ с)
а – ЛИЧ ($F_{\max} = 80$ Гц); б – ЛИП ($F_{\max} = 30$ Гц)

Заключение

1. 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. Условие (8) 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.

2. Наиболее эффективные последовательности ЛИП формируются при $F_{\max} = 30-40$ Гц

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

4. В дальней зоне корреляционных функций уровень помех преобразова-

ния для последовательностей ЛИП ниже, чем для последовательностей ЛИЧ, что в принципе позволяет получать более качественные сейсмические материалы при работе с развёртками ЛИП в условиях, характеризующихся повышенным динамическим диапазоном сейсмических записей.

Литература

1. Варакин Л.Е., 1970, Теория сложных сигналов: М. Сов. Радио, 376 с.
2. Кострыгин Ю.П., 2002, Сейсморазведка на сложных сигналах. – Тверь: Издательство ГЕРС. – 416 с.
3. Лукашин Ю.П., Гродзянская Т.М., Пушкин А.Г., 1977, Способ сейсмической разведки: СССР, авт. св. № 545946.
4. Роман В.И., Шпортюк Г.А., Михайличенко О.Г., Корольюк П.А., 1986, Перспективы применения дополнительных последовательностей импульсов в невзрывных методах сейсморазведки, ГСЗ и сейсмологии // Современные геодинамические процессы и их изучение в связи с проблемой прогноза землетрясений: Киев, Наукова думка, 22-26.