



Ю. П. Кострыгин  
Д. А. Колесников

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

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОДОИМПУЛЬСНОГО НАКАПЛИВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОДНОПОЛЯРНЫХ КОДОВ ЛИЧ И ЛИП

**АННОТАЦИЯ.** В данной статье по результатам математического моделирования выполнен сравнительный анализ эффективности кодоимпульсного накапливания сейсмических колебаний при использовании однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП. Показано, что если последовательности ЛИЧ, являющиеся наиболее эффективными для использования в нефтегазовой сейсморазведке, формируются при  $F_{\max} \approx 80$  Гц и  $T = 20 \dots 30$  с, то наиболее эффективные последовательности ЛИП формируются при  $F_{\max} = 30 \dots 40$  Гц и  $T = 20 \dots 30$  с. Главные максимумы ФВК, соответствующие эффективным последовательностям ЛИЧ и ЛИП, несущественно отличаются друг от друга по форме и длительности колебаний при одинаковых значениях  $f_{\text{вид}}$ . 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.

Наряду с кодами ЛИЧ [2] значительный интерес при кодоимпульсном накапливании сейсмических колебаний представляют однополярные коды с линейным изменением периода следования импульсов (коды ЛИП) [3]. Такие коды 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 [1].

Период следования импульсов  $T_n$  в развёртке ЛИП определяется условием

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

где  $T_0$  - начальный период следования импульсов;  $\Delta T$  - приращение периода следования импульсов;  $n$  - номер импульса в развёртке.

Используя формулу суммы членов арифметической прогрессии, можно определить относительное запазды-

**ABSTRACT.** In this article there was made comparative analysis of code pulse seismic accumulating performance the result of which was obtained by means of mathematical simulation and using bi-phase codes with frequency ramp and linearly varying period. It is shown that if sequences of frequency ramps are most efficient for oil and gas prospecting are formed at  $F_{\max} \approx 80$  Hz and  $T = 20 \dots 30$  s, the most efficient linearly varying period sequences are formed at  $F_{\max} = 30 \dots 40$  Hz and  $T = 20 \dots 30$  s. Main cross-correlation function maximums corresponding to frequency ramp and linearly varying period sequences are insignificantly different from each other in form and duration of vibrations with equal values of  $f_v$ . Along with that the level of interferences of transformations for linearly varying period sequences in the farthest zone are significantly lower than for frequency ramp sequences, which helps to obtain seismic materials of better quality when working with linearly varying period scanings in conditions characterised by increase of dynamic range of seismic records.

вание  $t_n$  для  $n$ -го импульса в развёртке ЛИП, т. е. функцию кода последовательности

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

В формуле (2) начальному импульсу присвоен номер 0.

Очевидно, что по аналогии с вибросейсмическим методом режимы работы кодоимпульсного излучателя следует задавать с использованием физически наиболее значимых параметров, реально определяющих эффективность метода. 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 (2), определяющей функцию кода развёртки ЛИП, параметры  $F_{\max}$ ,  $T$  и  $N$  отсутствуют. Поэтому не-

обходимо задать значения  $F_{\max}$ ,  $T$  и  $N$  через соответствующие им значения параметров  $T_0$  и  $\Delta T$ .

Запишем систему уравнений

$$T_0 - (N - 1) \Delta T = 1/F_{\max}; \quad (3)$$

$$NT_0 - [N(N - 1)\Delta T]/2 = T. \quad (4)$$

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

$$T_0 = 2T/N - 1/F_{\max}; \quad (5)$$

$$\Delta T = 2T/N(N - 1) - 2/(N - 1)F_{\max}. \quad (6)$$

Исследования с целью анализа сравнительной эффективности кодов ЛИП и ЛИЧ с применением методов математического моделирования были проведены в нашей стране в 80-е годы прошлого столетия [1]. Однако при постановке таких исследований учитывались методические и технические возможности на тот период времени, поэтому максимальная частота следования импульсов в развёртках  $F_{\max}$  была ограничена 45 Гц, а максимальная длительность развёрток  $T = 9$  с. По результатам сопоставления эффективности кодов ЛИЧ и ЛИП, выполненного на начальной стадии развития кодоимпульсного метода, было показано, что при  $F_{\max} \leq 45$  Гц и  $T \leq 9$  с в ряде случаев развёртки ЛИП обеспечивают более высокую эффективность кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний, что в первую

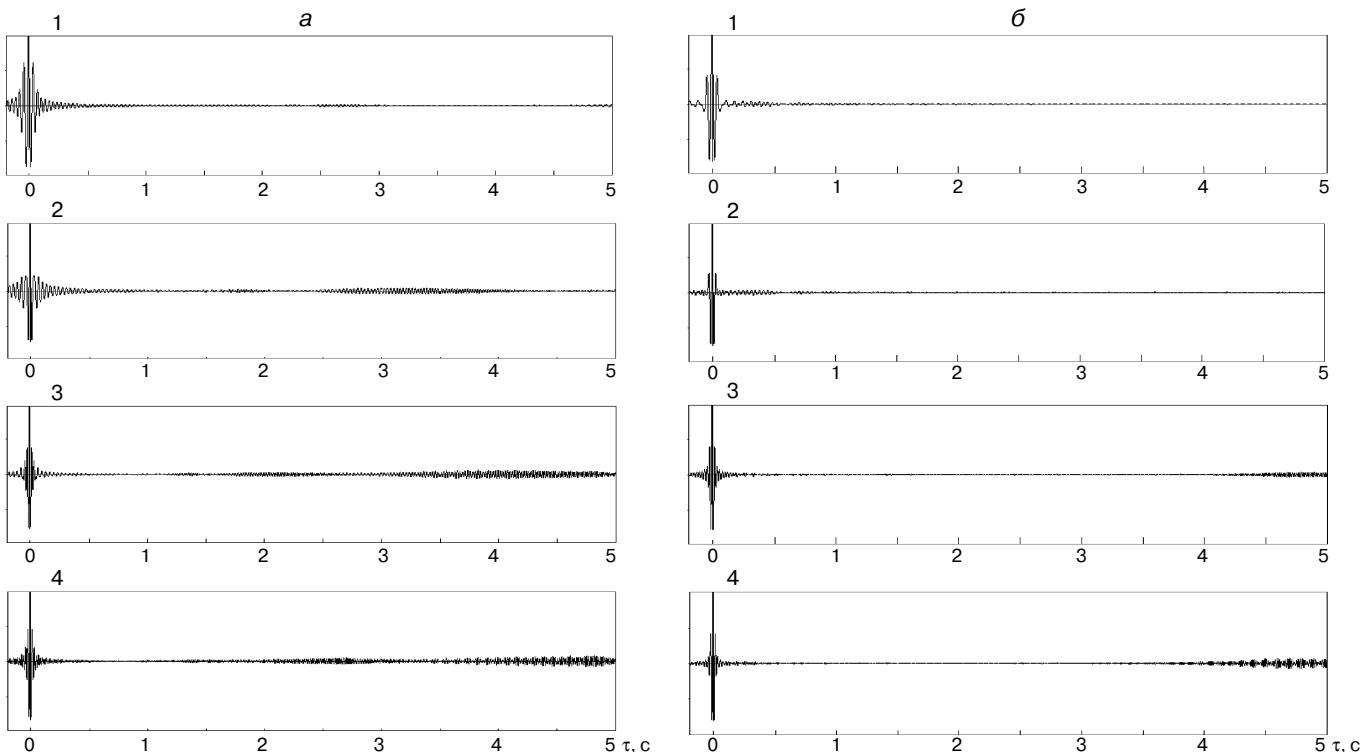
очередь связано с более равномерным распределением помех преобразования.

Так, на рис. 1 сопоставлены функции взаимной корреляции (ФВК) последовательностей ЛИЧ и ЛИП при  $F_{\max} = 30$  Гц,  $T = 10$  с и  $N = 201$ . Для кодов ЛИЧ  $F_{\min}$  равнялось 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 видимыми частотами 25, 35, 45 и 55 Гц.

При вычислении ФВК временное сжатие импульсных последовательностей  $X(t)$  осуществлялось путём корреляционной свёртки  $X(t) * K(-t)$ , где  $K(t)$  - функция кода последовательности.

Анализ записей, представленных на рис. 1, позволяет сделать вывод о том, что в данном случае последовательности ЛИП в целом обеспечили более высокое качество коррелограмм. На основании результатов ряда аналогичных сопоставлений, выполненных на ранней стадии становления метода, и сформировался определённый интерес к использованию кодов ЛИП.

В настоящее время имеются принципиальные возможности повышения  $F_{\max}$  электромеханических излучателей с 40 до 80 Гц, при этом длительности развёрток могут быть весьма существенно увеличены. В работе [2] рассмотрены результаты математического моделирования, проведённого с целью оценки возможности повышения эффективности применения однополярных ко-



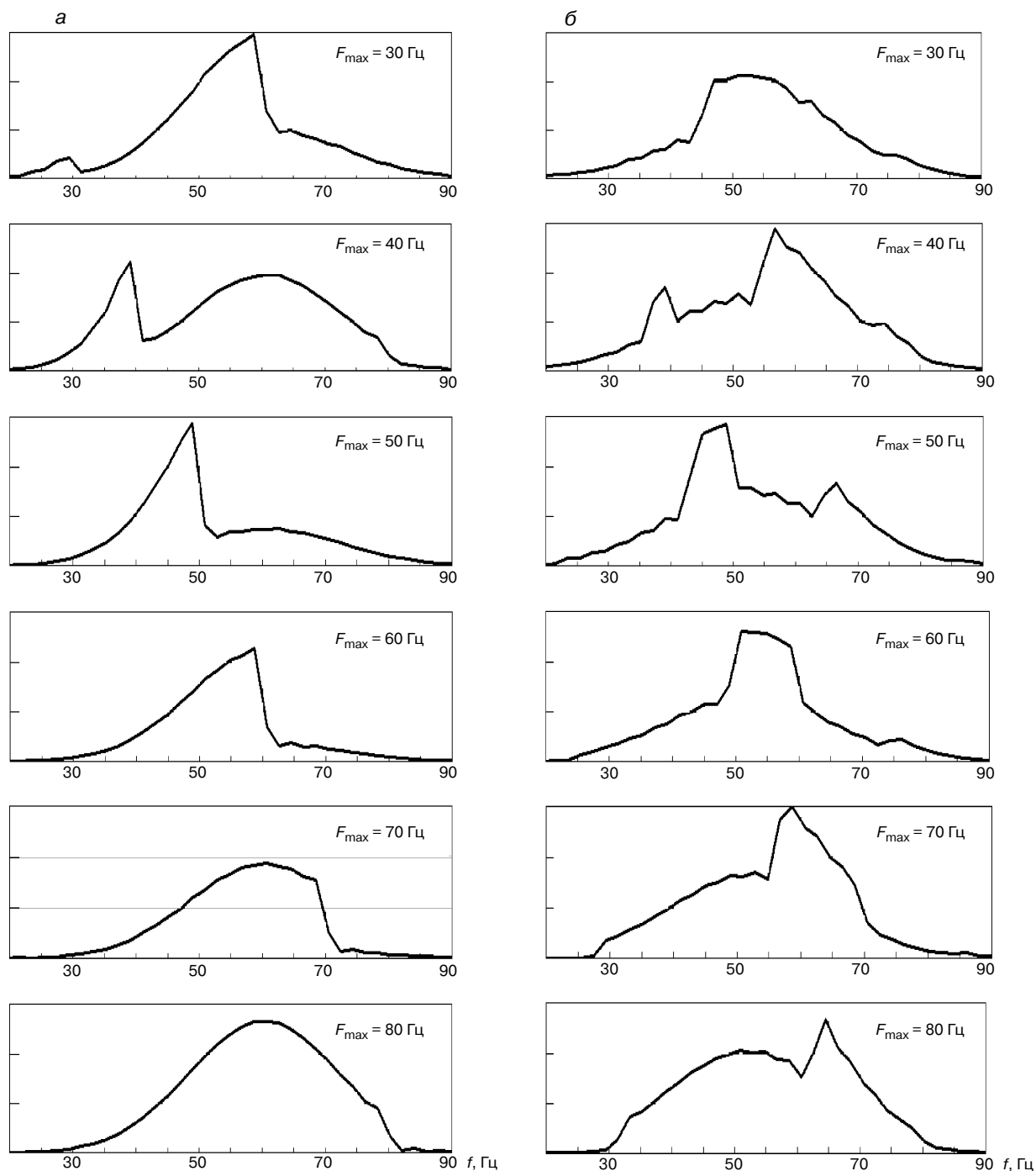
**Рис. 1.** Сопоставление функций взаимной корреляции последовательностей ЛИЧ (а) и ЛИП (б) при  $F_{\max} = 30$  Гц,  $T = 10$  с,  $N = 201$ :

1 -  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц, 2 -  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц; 3 -  $f_{\text{вид}} = 45$  Гц; 4 -  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц

дов ЛИЧ путём существенного увеличения значений параметров  $T$  и  $F_{\max}$ . Показано, что увеличение максимальной частоты следования импульсов  $F_{\max}$  при использовании однополярных развёрток ЛИЧ, в соответствии с условием (7), создаёт принципиальные возможности для повышения временной разрешающей способности кодоимпульсного метода до уровня разрешающей способности вибросейсмического метода. В этом случае форма главных максимумов ФВК последовательностей

ЛИЧ практически не отличается от собственного процесса совокупной колебательной системы “излучатель-грунт” и геологической среды. Указанный режим обеспечивает наиболее эффективное использование кодоимпульсных сигналов ЛИЧ.

На рис. 2 сопоставлены спектры главных максимумов ФВК кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ и ЛИП. Окно расчёта спектров соответствовало интервалу главного максимума ФВК от  $-0,1$  с до  $+0,1$  с. Дли-



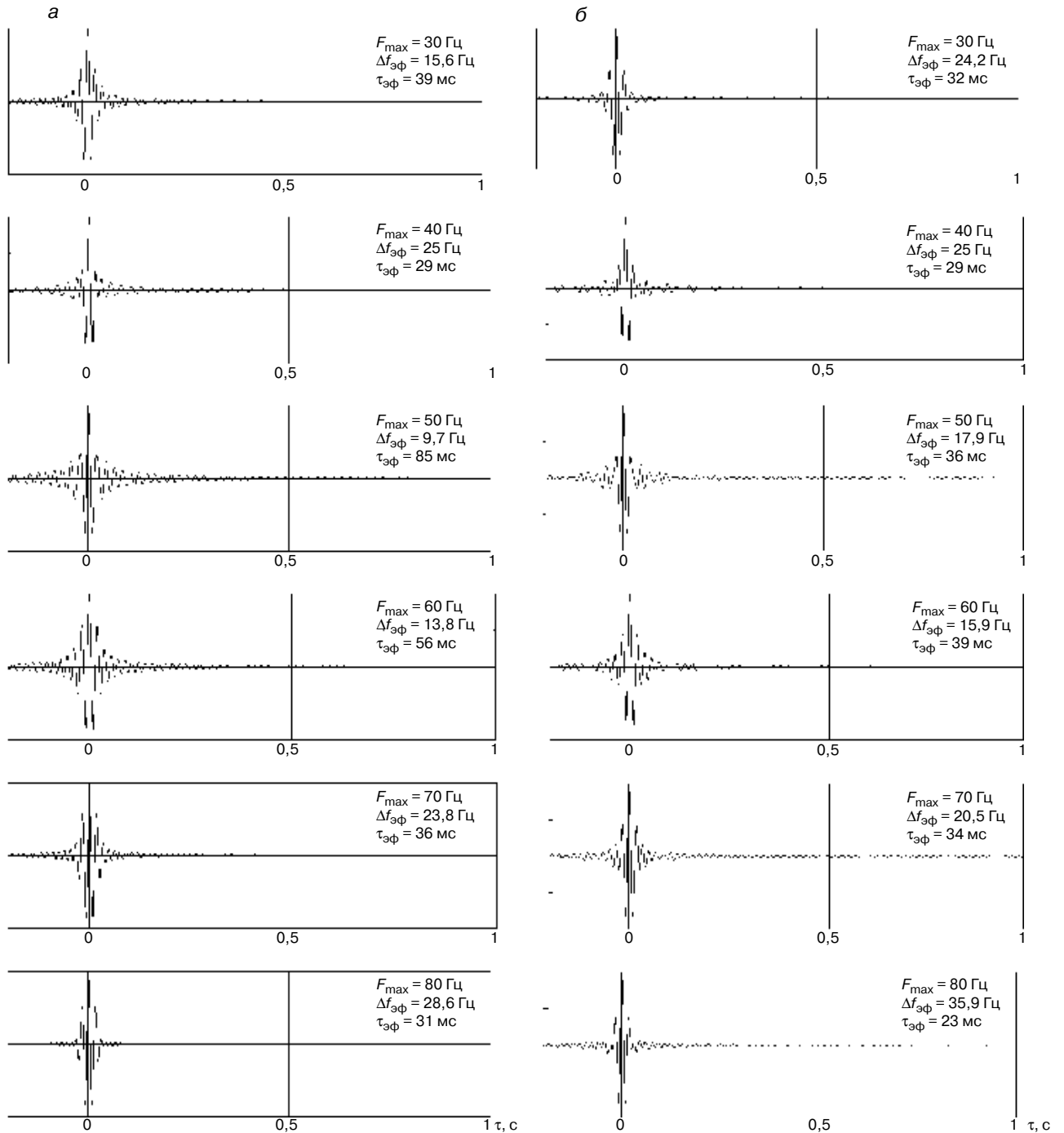
**Рис. 2.** Сопоставление спектров главных максимумов ФВК для последовательностей ЛИЧ (а) и ЛИП (б) ( $f_{\text{вид}} = 55$  Гц,  $T = 30$  с)

тельности развёрток  $T = 30$  с, значения  $f_{\text{вид}}$  равнялись 55 Гц, максимальная частота развёрток  $F_{\text{max}}$  изменялась от 30 до 80 Гц.

$$F_{\text{max}} \geq f_{\text{вид}} + 25 \text{ Гц.} \quad (7)$$

Из рис. 2 можно видеть, что при  $F_{\text{max}} \geq 50$  Гц с увеличением  $F_{\text{max}}$  форма спектра ФВК для последовательностей ЛИЧ становится более простой, а правая грани-

чная частота смещается в область верхних частот. Начиная с  $F_{\text{max}} = 80$  Гц спектр ФВК приобретает практически симметричную форму, совпадающую с формой спектра единичного импульса развёртки, при этом корреляционный импульс последовательности становится предельно компактным и также совпадает по форме с единичным импульсом (см. рис. 3, а). В данном примере вторые максимумы спектров корреляционных импуль-



**Рис. 3.** Главные максимумы ФВК последовательностей ЛИЧ и ЛИП ( $f_{\text{вид}} = 55$  Гц,  $T = 30$  с):  
а - последовательности ЛИЧ; б - последовательности ЛИП

сов последовательностей ЛИЧ при  $F_{\max} = 30...40$  Гц сформированы гармониками, соответствующими кратным гармоникам функций кода, и поэтому не вписываются в указанную закономерность.

На основании анализа графиков, представленных на рис. 2, очевидно также, что для кодов ЛИП связь между формой спектра главного максимума ФВК и параметром  $F_{\max}$  более сложная и крайне неоднозначная по сравнению с аналогичной зависимостью для кодов ЛИЧ. Физически это связано с несколько большим влиянием на процесс формирования корреляционных импульсов последовательностей ЛИП вторых гармоник функции кода.

Очевидно при этом, что достаточно сложная зависимость между эффективной шириной спектра главного максимума ФВК  $\Delta f_{\text{эф}}$  и  $F_{\max}$  будет коррелироваться с эффективной длительностью главного максимума ФВК  $\tau_{\text{эф}}$ , т. е. более широкому спектру будет соответствовать более компактный импульс. Так, на рис. 3 сопоставлены импульсы главных максимумов ФВК последовательностей ЛИП и ЛИЧ. Длительности развёрток  $T = 30$  с,  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц. Значения  $F_{\max}$  изменялись от 30 до 80 Гц. На рис. 3 указаны значения эффективной длительности корреляционных импульсов, определяемые как отрезки ФВК, в которых сосредоточено 85% энергии корреляционной функции, рассчитанной в интервале  $-2 \text{ с} \leq \tau \leq +2 \text{ с}$ . Приведённые здесь же значения эффективной ширины спектров  $\Delta f_{\text{эф}}$  ФВК определялись как среднее арифметическое ширины спектров на уровне 0,7; 0,5 и 0,3. Материалы, представленные на рис. 3, подтверждают устойчивую обратную зависимость между значениями параметров  $\Delta f_{\text{эф}}$  и  $\tau_{\text{эф}}$  для ФВК кодоимпульсных сигналов.

Таким образом, из рис. 2 и 3 можно сделать вывод о том, что для последовательностей ЛИП достаточно 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  $\tau_{\text{эф}} \leq 2/f_{\text{вид}}$ .

Из табл. 1 следует, что для низкочастотных импульсов с  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц и при  $F_{\max} \geq 50$  Гц эффективные последовательности ЛИП отсутствуют, так как в этом случае ФВК будет характеризоваться повышенными значениями длительности главного максимума. Вместе с тем, при любом значении  $F_{\max}$ , равном или превышающем 50 Гц, в табл. 1 можно назвать одно-два значения  $f_{\text{вид}}$  импульса, при котором ФВК последовательности будет иметь достаточно качественную динамику. Однако, очевидно, что на сейсмограммах обычно присутствуют импульсы с различной преобладающей частотой 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. табл. 1). Поэтому, последовательности ЛИП, являющиеся наиболее эффективными для использования в нефтегазовой сейсморазведке, формируются при  $F_{\max} = 30...40$  Гц.

## 1. Эффективные коды ЛИП

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

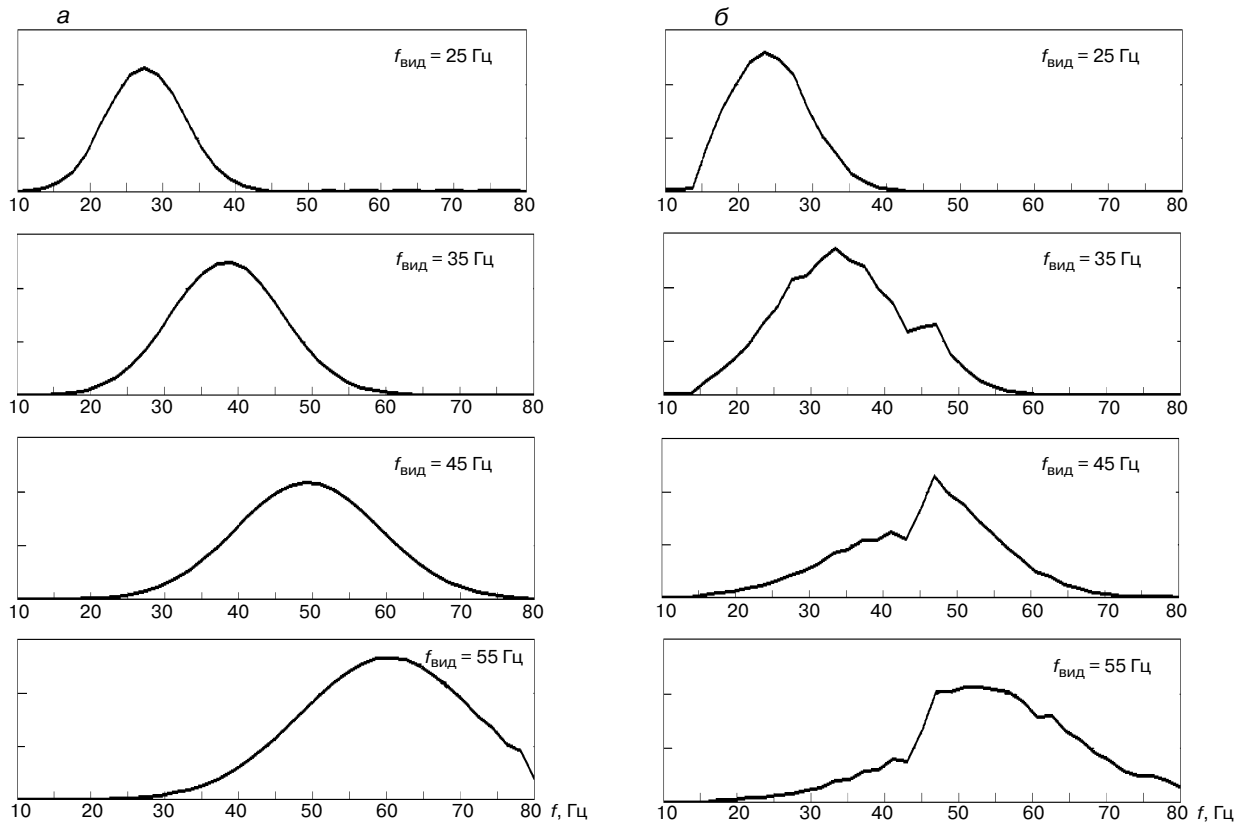
*Примечание.* Эффективные коды отмечены жирным шрифтом.

С практической точки зрения целесообразно сопоставить эффективные последовательности ЛИЧ и ЛИП, т. е. последовательности ЛИЧ, для которых  $F_{\max} = 80$  Гц и последовательности ЛИП, для которых  $F_{\max} = 30...40$  Гц.

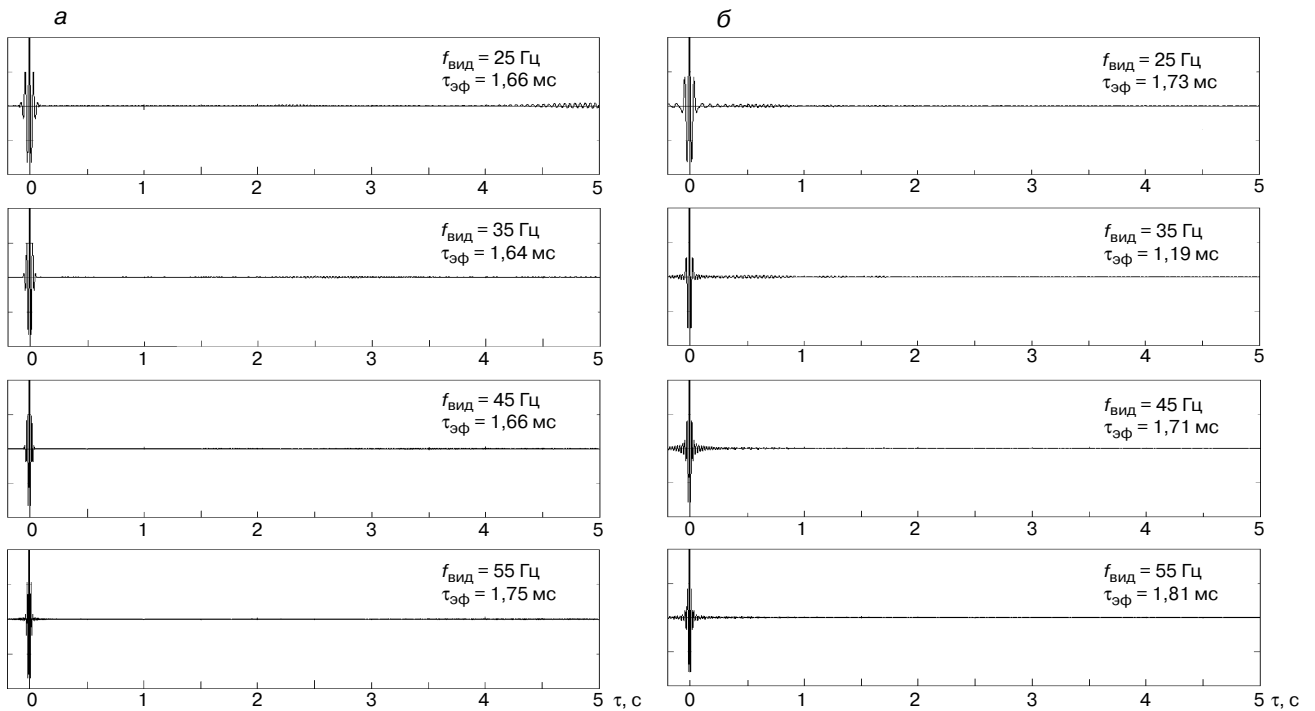
На рис. 4 сопоставлены спектры главных максимумов ФВК эффективных последовательностей ЛИЧ и ЛИП. Из рисунка видно, что спектры последовательностей ЛИП с некоторым приближением аппроксимируют аналогичные спектры ЛИЧ, и это даёт основание предполагать, что эффективные последовательности ЛИП и ЛИЧ будут 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  $f_{\text{вид}}$ , сопоставлены 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  $\tau_{\text{эф}}$ . 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.

Так, в табл. 2 приведены значения динамического диапазона корреляционного преобразования  $D(\tau)$ , рас-



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



**Рис. 5.** Сопоставление ФVK наиболее эффективных по следовательностей ЛИЧ и ЛИП ( $T = 30$  с):  
 а - ЛИЧ ( $F_{\max} = 80$  Гц); б - ЛИП ( $F_{\max} = 30$  Гц)

**2. Значения динамического диапазона корреляционного преобразования импульсных последовательностей (в децибелах) на временах, кратных 0,5 с**

Тип развёртки	Параметры развёрток	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
ЛИЧ	$f_{\text{вид}} = 25 \text{ Гц}$ $F_{\text{max}} = 80 \text{ Гц}$	43,5	43,7	44,0	42,5	41,4	44,4	44,6	42,9	35,2	31,2
	$f_{\text{вид}} = 35 \text{ Гц}$ $F_{\text{max}} = 80 \text{ Гц}$	46,7	46,9	45,7	45,9	41,1	42,2	45,5	47,4	45,6	45,1
	$f_{\text{вид}} = 45 \text{ Гц}$ $F_{\text{max}} = 80 \text{ Гц}$	52,1	52,0	48,4	48,4	49,8	46,0	43,6	46,0	47,4	47,6
	$f_{\text{вид}} = 55 \text{ Гц}$ $F_{\text{max}} = 80 \text{ Гц}$	51,6	53,4	51,2	49,9	54,0	51,7	47,5	46,2	45,1	46,2
ЛИП	$f_{\text{вид}} = 25 \text{ Гц}$ $F_{\text{max}} = 30 \text{ Гц}$	36,8	42,4	44,9	48,5	49,9	51,8	52,1	53,2	53,5	54,7
	$f_{\text{вид}} = 35 \text{ Гц}$ $F_{\text{max}} = 30 \text{ Гц}$	37,2	43,0	45,5	50,0	50,5	52,7	52,7	54,6	53,2	54,9
	$f_{\text{вид}} = 45 \text{ Гц}$ $F_{\text{max}} = 30 \text{ Гц}$	41,3	48,1	49,5	54,2	52,9	54,0	54,5	55,1	57,6	58,0
	$f_{\text{вид}} = 45 \text{ Гц}$ $F_{\text{max}} = 30 \text{ Гц}$	42,6	48,9	51,5	55,1	54,7	55,1	55,1	56,0	58,9	58,0

считанные для эффективных последовательностей ЛИЧ и ЛИП по формуле

$$D(\tau) = 20 \lg A_{\text{max}}/\sigma(\tau), \quad (8)$$

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

Из табл. 2 следует, что по сравнению с кодами ЛИЧ применение кодов ЛИП позволяет снизить уровень корреляционного фона на 4,1 - 7,2 дБ при  $\tau = 2$  с; на 3,4 - 10,5 дБ при  $\tau = 3$  с; на 7,2 - 13,1 дБ при  $\tau = 4$  с и на 9,8 - 23,5 дБ при  $\tau = 5$  с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для кодов ЛИП связь между формой спектра главного максимума ФВК и параметрами  $F_{\text{max}}$  и  $f_{\text{вид}}$  более сложная и крайне неоднозначная по сравнению с аналогичной зависимостью для кодов ЛИЧ. Это связано с несколько большим влиянием на процесс формирования корреляционных импульсов последовательностей ЛИП вторых гармоник функции кода.

2. Если последовательности ЛИЧ, являющиеся наиболее эффективными для использования в нефтегазовой сейсморазведке, формируются при  $F_{\text{max}} \approx 80 \text{ Гц}$  и  $T = 20...30 \text{ с}$ , то наиболее эффективные последовательности ЛИП формируются при  $F_{\text{max}} = 30...40 \text{ Гц}$  и  $T = 20...30 \text{ с}$ .

3. Главные максимумы ФВК, соответствующие эффективным кодам ЛИЧ и ЛИП, несущественно различаются по форме и длительности колебаний при одинаковых значениях  $f_{\text{вид}}$ .

Столь незначительные различия между корреляционными импульсами эффективных последовательностей ЛИЧ и ЛИП практически не могут повлиять на результативность сейсморазведочных работ.

4. 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.

5. В связи с более значительным числом импульсов в эффективных последовательностях ЛИЧ ( $F_{\text{max}} \approx 80 \text{ Гц}$ ) помехоустойчивость кодоимпульсного метода по отношению к некогерентным помехам при работе с такими развёртками примерно в 1,3 раза превышает помехоустойчивость метода в случае использования эффективных последовательностей ЛИП ( $F_{\text{max}} \approx 30...40 \text{ Гц}$ ) при условии одинакового времени воздействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кострыгин Ю. П., 2002, Сейсморазведка на сложных сигналах: Тверь, Изд-во ГЕРС.
2. Кострыгин Ю. П., Колесников Д. А., 2010, Оценка возможности повышения эффективности кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний с использованием однополярных кодов ЛИЧ путём увеличения длительности и максимальной частоты развёрток: Технологии сейсморазведки, 3, 110 - 114.
3. Лукашин Ю. П., Гродзянская Т. М., Пушкин А. Г., 1977, Способ сейсмической разведки: Авт. св. СССР № 545946.

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

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

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