

2012, «Приборы и системы разведочной геофизики», 4, 57-67.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОДОИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

**Часть 2. Методические возможности ослабления корреляционного фона при использовании однополярных кодов; влияние амплитудной неидентичности импульсов в развёртках на эффективность метода**

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ФОНА ПРИ КОДОИМПУЛЬСНОМ НАКАПЛИВАНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОПОЛЯРНЫХ КОДОВ

Как мы уже отмечали в первой части данной работы, при правильном выборе параметров однополярных развёрток ЛИЧ и ЛИП разрешающая способность кодоимпульсного метода не уступает разрешающей способности вибросейсмического метода. Вместе с тем, даже наиболее эффективные последовательности ЛИЧ и ЛИП характеризуются во временном интервале  $\tau = 0,5 \div 4$  с средними значениями динамического диапазона корреляционного преобразования, равными  $45 \div 49$  дБ для последовательностей ЛИЧ и  $48 \div 52$  дБ для последовательностей ЛИП что существенно меньше динамического диапазона преобразования вибросейсмических ЛЧМ-сигналов. Такие особенности однополярных кодоимпульсных сигналов могут приводить к снижению эффективности кодоимпульсного метода по сравнению с эффективностью вибросейсмического метода в условиях, характеризующихся повышенным динамическим диапазоном сейсмических записей.

В вибросейсмической разведке уменьшение интенсивности помех корреляционного преобразования достигается, как известно, путём применения управляющих сигналов с плавно возрастающими в начале и убывающими в конце развёртки амплитудами. Интервал времени изменения амплитудных значений сигнала в краевых частях развёртки называется конусностью или временем скоса  $t_{ск}$ . Оценим возможности ослабления корреляционного фона при кодоимпульсном накапливании колебаний путём задания конусности по краям функции кода последовательностей. Трапецеидальное (линейное) огибание краевых частей функции кода можно задать следующим образом:

$$A_{ск}(t) = \begin{cases} (A_0 / t_{ск}) \cdot t & \text{при } 0 \leq t \leq t_{ск} \\ A_0 - [t - (T - t_{ск})] A_0 / t_{ск} & \text{при } T - t_{ск} \leq t \leq T, \end{cases} \quad (1)$$

где  $A_0$  – амплитуда кодоимпульсного сигнала за пределами скосов,  $T$  – длительность развёртки.

На рис.1 сопоставлены спектры ФВК и главные максимумы ФВК кодоимпульсных сигналов ЛИП в случае использования скосов (б) и без использования скосов (а). Из рисунка можно видеть, что для наиболее эффективных кодов ЛИП ( $F_{max} = 30 \div 40$  Гц) огибание краевых частей импульсных последовательностей приводит лишь к ухудшению качества коррелограмм.

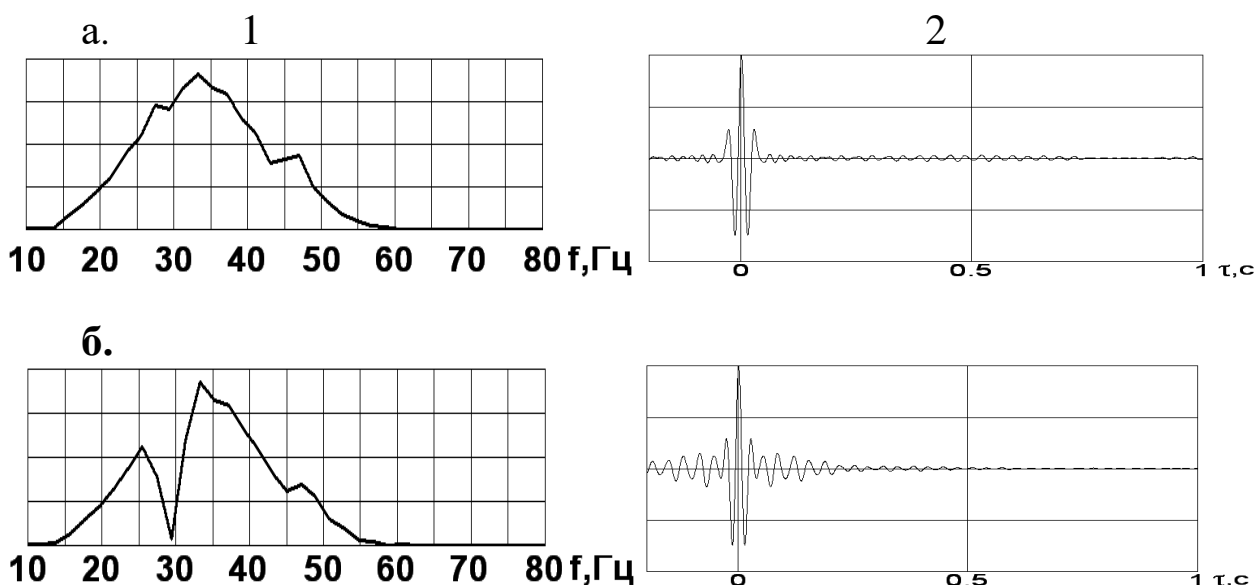


Рис. 1. Амплитудные спектры главных максимумов ФVK (1) и главные максимумы ФVK (2), рассчитанные для последовательности ЛИП без применения скосов и при конусности  $t_{ск} = 2$  с ( $T = 20$  с, максимальная частота развёртки  $F_{max} = 30$  Гц, видимая частота единичного импульса  $f_{вид} = 35$  Гц, количество импульсов в развёртке  $N=401$ )

а – без скосов; б – использован скос,  $t_{ск} = 2$  с

Действительно, вследствие огибания функции кода ЛИП в спектре главного максимума ФVK последовательности возникает достаточно глубокий провал, обуславливающий в свою очередь существенное увеличение эффективной длительности корреляционного импульса. Физически указанное обстоятельство связано с тем, что в данном случае часть спектра, расположенная левее 30 Гц, формируется основными гармониками функции кода, в то время как формирование более высокочастотной части спектра, соответствующей интервалу 30-60 Гц, обязано вторым гармоникам функции кода. Таким образом, диапазон частот, соответствующий правому скосу расположен внутри полосы частот спектра ФVK, что и обуславливает в данном случае появление провала в области  $\approx 30$  Гц.

В отличие от эффективных кодов ЛИП ( $F_{max} = 30 \div 40$  Гц), огибание эффективных кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ ( $F_{max} = 80$  Гц,  $T = 20 - 30$  с) позволяет несколько ослабить интенсивность корреляционного фона. При параметрах скоса, равных 10% от длительности развёртки, корреляционный фон для кодоимпульсных сигналов ЛИЧ уменьшается на  $\approx 3$  дБ. Т.е эффективность применения скосов для кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ существенно уступает эффективности применения скосов для вибросейсмических развёрток [2]. Поэтому огибание кодоимпульсных сигналов ЛИЧ целесообразно осуществлять исключительно в комплексе с другими методическими приёмами, позволяющими дополнительно уменьшить уровень корреляционного фона.

К таким методическим приёмам в первую очередь относится способ комбинированных сигналов, предполагающий возбуждение на каждом пикете нескольких кодоимпульсных развёрток ЛИЧ с различными параметрами, и суммирование коррелограмм, соответствующих одноимённым пунктам возбуждения. [2]. Указанный способ является аналогом способа комбинированных вибросейсмических сигналов, легко реализуется при проведении полевых сейсморазведочных работ и позволяет дополнительно уменьшить влияние корреляционного фона.

Оценка эффективности применения комбинированных кодоимпульсных сигналов была выполнена с использованием комбинированных сигналов ЛИЧ, состоящих из 4-х и 8 сегментов. Сегменты, входящие в сигнал, отличались значениями минимальной частоты развёртки  $F_{\min}$ . При этом дискретность изменения  $F_{\min}$  составляла 1 Гц и 2 Гц. Остальные параметры развёрток, входящих в комбинированные сигналы, оставались без изменения:  $T = 20$  с,  $F_{\max} = 80$  Гц;  $t_{\text{ск}} = 0,1$  Т.

Результаты выполненного моделирования показывают, что по сравнению с одиночными последовательностями ЛИЧ применение комбинированных развёрток, состоящих из четырёх сегментов, при дискретности изменения  $F_{\min}$ , равной 2 Гц, позволяет ослабить корреляционный фон на 7-12 дБ при  $\tau = 1,5 - 5,0$  с. Дальнейшее увеличение числа сегментов в комбинированном сигнале до восьми не способствует снижению уровня помех преобразования.

В принципе комбинированные развёртки можно формировать путём изменения длительности отдельных сегментов, либо путём одновременного изменения длительности и минимальной частоты сегментов. На основании моделирования было показано, что комбинированные кодоимпульсные сигналы ЛИЧ, состоящие из четырёх - восьми сегментов с различными значениями  $T$ , не обеспечивают повышение качества коррелограмм по сравнению с комбинированными развёртками при дискретности изменения  $F_{\min}$ , равной 2 Гц. Более того, при использовании таких развёрток наблюдается уменьшение динамического диапазона корреляционного преобразования в интервале  $\tau = 2,5 - 5,0$  с, что не позволяет рекомендовать их к практическому применению.

Была сделана также оценка целесообразности применения комбинированных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, в которых одновременно изменялись бы значения  $F_{\min}$  и  $T$ . По результатам моделирования было показано, что использование комбинированных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, в которых одновременно изменялись бы параметры  $F_{\min}$  и  $T$ , в основном не обеспечивает дополнительное увеличение динамического диапазона корреляционного преобразования по сравнению с комбинированными сигналами, состоящими из сегментов, в которых изменяются лишь значения параметра  $F_{\min}$ . Вместе с тем, применение таких комбинированных сигналов требует некоторого усложнения технологии регистрации колебаний и поэтому является не целесообразным.

Заметное повышение динамического диапазона корреляционного преобразования наблюдается для комбинированных развёрток, формируемых с использованием последовательностей ЛИП различной длительности (см. таблицу №1). По сравнению с наиболее эффективными одиночными последовательностями ЛИП ( $F_{\max} = 30$  Гц) комбинированные развёртки, состоящие из четырёх сегментов различной длительности, обеспечивают во временном интервале корреляционной функции  $\tau = 0,5 - 4,0$  с ослабление корреляционного фона в среднем на 6 дБ, а комбинированные развёртки, состоящие из восьми сегментов в среднем на 8 - 9 дБ в зависимости от значения  $f_{\text{вид}}$ . При этом среднее значение динамического диапазона преобразования наиболее эффективных последовательностей ЛИП в интервале  $\tau = 0,5 - 4,0$  с достигает в случае использования комбинированных сигналов, состоящих из четырёх сегментов, 54 дБ для значений  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и 58 дБ для  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц. При использовании же комбинированных сигналов, состоящих из восьми развёрток ЛИП различной длительности, аналогичные средние значения динамического диапазона преобразования увеличиваются соответственно до 57 дБ и 60 дБ, т.е. приближаются к динамическому диапазону вибросейсмических ЛЧМ-сигналов..

**Таблица №1**  
**Значения динамического диапазона преобразования в децибеллах на временах,**  
**кратных 0,5 с для одиночных и комбинированных кодоимпульсных сигналов ЛИП**  
**( $F_{\max}=30$  Гц;  $t_{\text{ск}} = 0$ )**

$f_{\text{вид}}$	Параметры развёрток	0,5 с	1,0 с	1,5 с	2,0 с	2,5 с	3,0 с	3,5 с	4,0 с	4,5 с	5,0 с
35 Гц	Одиночная развёртка, $T = 20$ с	35,7	45,13	46,04	49,08	50,51	51,53	52,05	51,88	53,82	54,39
	Комбинированная развёртка: $T_{1-4} = 20$ с, 21 с, 22 с, 23 с.	39,1	48,60	55,48	55,97	57,25	56,16	58,14	59,74	58,98	60,70
	Комбинированная развёртка: $T_{1-8} = 20$ с, 21 с, 22 с, 23 с, 24 с, 25 с, 26 с, 27 с.	42,3	53,96	58,83	58,45	59,79	59,52	61,29	61,59	60,81	62,98
55 Гц	Одиночная развёртка, $T = 20$ с	42,0	49,98	53,00	53,63	52,52	55,78	53,81	54,33	55,33	56,64
	Комбинированная развёртка $T = 20$ с, 21 с, 22 с, 23 с.	47,6	55,72	59,16	60,27	59,86	58,64	60,53	60,22	60,14	56,78
	Комбинированная развёртка: $T_{1-8} = 20$ с, 21 с, 22 с, 23 с, 24 с, 25 с, 26 с, 27 с.	51,2	59,76	61,33	62,48	62,28	62,58	61,54	56,62	51,38	47,79

#### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДНОЙ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ИМПУЛЬСОВ В РАЗВЁРТКАХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОДОИМПУЛЬСНОГО НАКАПЛИВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В отличие от «идеальных» кодоимпульсных сигналов, характеризующихся постоянной амплитудой единичных импульсов, последовательности, формируемые реальными сейсмическими источниками, обладают некоторой амплитудной неидентичностью импульсов в развёртке. Так, например, для ранее разработанных излучателей индукционно-динамического типа, использованных с целью возбуждения кодоимпульсных последовательностей, амплитуда импульсов  $A_{\text{имп}}$  непрерывно уменьшалась по мере увеличения частоты следования  $F$ . Экспериментальная зависимость  $A_{\text{имп}}$  ( $F$ ), полученная для серийного кодоимпульсного источника ИКИ-10/40, удовлетворительно аппроксимируется при  $F \geq 5$  Гц степенной функцией [2]

$$A_{\text{имп}} = k \cdot F^{-p}. \quad (2)$$

Для серийного кодоимпульсного излучателя ИКИ-10/40 параметр  $p \approx 0,65$ .

Временную функцию, определяющую закон изменения относительной амплитуды кодоимпульсного сигнала ЛИЧ в соответствии с условием (2), можно представить следующим образом:

$$A_{\text{имп}}(t) \sim [F_{\min} + (\Delta F / T) t]^{-p}, \quad (3)$$

Заменив в выражении (3) аргумент  $t$  на аргумент  $t_n$ , соответствующий временному положению импульсов функции кода в зависимости от их порядкового номера  $n$ , и воспользовавшись уравнением функции кода развёртки ЛИЧ, можно задать относительную амплитуду произвольного импульса в развёртке.

$$A_{\text{имп}}(n) \sim \sqrt{F_{\text{мин}}^2 + 2n\Delta F/T}^{-p} \quad (4)$$

а.

б.

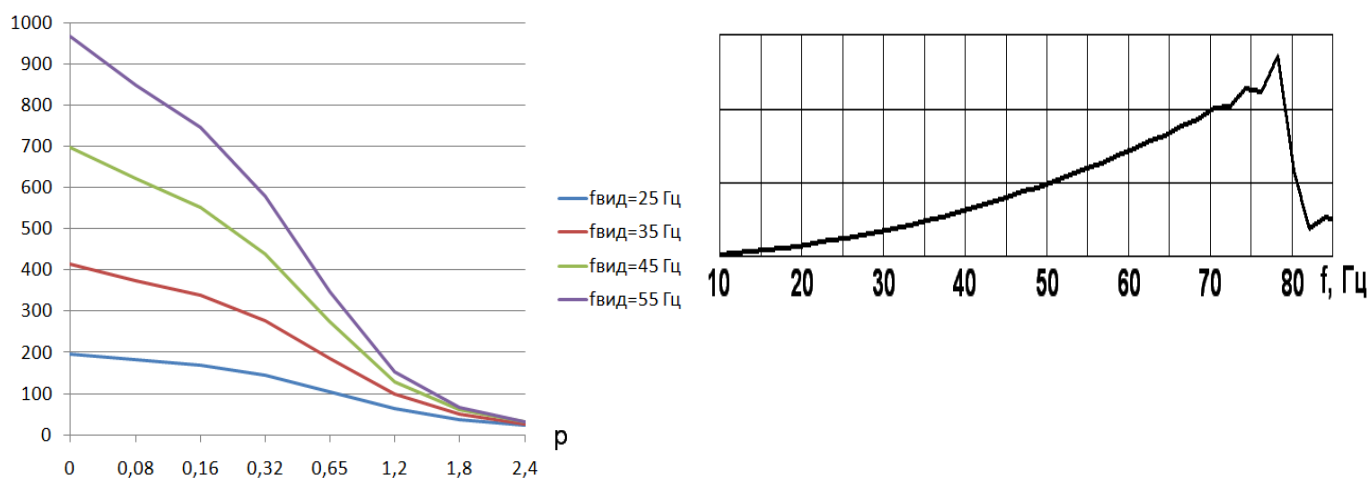


Рис. 2. Влияние амплитудной неидентичности импульсов в кодоимпульсных развёртках ЛИЧ на динамику ФВК последовательности ( $F_{\text{мин}} = 10$  Гц,  $F_{\text{макс}} = 80$  Гц,  $T = 20$  с, скос  $t_{\text{ск}} = 2$  с)  
а – зависимость амплитуды ФВК от  $p$ ; б – спектр ФВК функции кода ЛИЧ.

Выполненные модельные исследования показали, что при использовании наиболее эффективной для нефтегазовой сейсморазведки кодоимпульсной последовательности ЛИЧ ( $F_{\text{макс}} = 80$  Гц,  $T = 20-30$  с) неидентичность импульсов в развёртке, определяемая степенной функцией (4), практически не влияет на форму главного максимума ФВК и форму соответствующего ему спектра даже при повышенных значениях параметра  $p$ , равных 0,32 -0,65. Расчёты показали также, что при значениях параметра  $p \leq 0,32$  неидентичность импульсов в развёртке также, весьма не существенно влияет на уровень помех преобразования в дальней зоне корреляционной функции (см. таблицу №2).

Таблица №2

**Значения динамического диапазона корреляционного преобразования импульсных последовательностей ЛИЧ в децибеллах на временах, кратных 0,5 с в зависимости от параметра  $p$  ( $F_{\text{мин}} = 10$  Гц,  $F_{\text{макс}} = 80$  Гц,  $T = 20$  с,  $t_{\text{ск}} = 2$  с,  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц)**

№	Значения $p$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
1	$p = 0$	54,52	53,33	50,10	52,25	44,49	43,35	47,62	49,59	50,06	47,53
2	0,08	54,60	53,33	49,76	52,01	44,09	43,07	47,46	49,44	49,83	47,38
3	0,16	54,67	53,32	49,41	51,75	43,69	42,78	47,30	49,29	49,60	47,23
4	0,32	54,80	53,21	48,64	51,17	42,91	42,22	46,98	48,97	49,12	46,93
5	0,65	54,97	52,66	46,90	49,75	41,36	41,13	46,36	48,26	48,11	46,36
6	1,2	54,86	50,62	43,83	47,10	39,03	39,60	45,55	47,05	46,59	45,61
7	1,8	54,08	47,40	40,71	44,37	37,01	38,45	45,10	45,95	45,40	45,25
8	2,4	52,79	44,11	38,15	42,20	35,67	37,99	45,19	45,32	44,89	45,50

Таким образом, динамика корреляционных функций для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ ( $F_{\text{макс}} \approx 80$  Гц и  $T = 20-30$  с) практически не искажается при

амплитудной неидентичности импульсов в развёртке, определяемой степенной функцией (4), при условии  $p \leq 0,32$ , т.е. при двух кратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне 10-80 Гц. Вместе с тем очевидно, что уменьшение амплитуды возбуждаемых импульсов по мере увеличения частоты следования приведёт к снижению общей энергии формируемого сигнала, а значит и к снижению помехоустойчивости метода по отношению к некогерентным помехам. Принимая при этом во внимание то обстоятельство, что амплитуда некогерентных помех на коррелограмме в принципе не зависит от амплитудной неидентичности возбуждаемых импульсов, можно утверждать, что отношение сигнал/помеха на коррелограмме будет пропорционально лишь максимальному значению ФВК импульсной последовательности.

Так, на рис. 2, а представлены графики пиковой амплитуды главного максимума ФВК эффективной импульсной последовательности ЛИЧ в зависимости от параметра  $p$ , рассчитанные для импульсов с различной преобладающей частотой  $f_{\text{вид}}$ . Из рисунка 2, а можно видеть, что при двух кратном уменьшении амплитуды импульсов по мере увеличения частоты следования от 10 Гц до 80 Гц, т.е. при  $p = 0,32$ , амплитуда ФВК, а значит и помехоустойчивость метода, уменьшается в  $\approx 1,78$  раза для  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц, в  $\approx 1,63$  раза для  $f_{\text{вид}} = 45$  Гц, в  $\approx 1,46$  раза для  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и в  $\approx 1,43$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц. Скомпенсировать указанное снижение помехоустойчивости метода представляется возможным либо путём увеличения числа излучателей в группе в  $\approx 1,5$  раза, либо за счёт более чем  $\approx 2$ -х кратного увеличения числа воздействий, что приведёт к существенным экономическим потерям при проведении полевых работ.

В качестве приемлемого компромисса при формулировании технического задания на излучатель, используемый для формирования кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, следует, по-видимому, рассматривать амплитудную неидентичность импульсов в развёртке, соответствующую значениям параметра  $p \leq 0,16$ .

Анализируя графики, приведённые на рис. 2, а, следует обратить внимание на весьма интересное обстоятельство, заключающееся в том, что амплитуда главного максимума ФВК при использовании кодоимпульсных сигналов ЛИЧ может существенно возрасти по мере увеличения преобладающей частоты импульсов  $f_{\text{вид}}$ . Физически это связано с тем, что спектр функции кода ЛИЧ имеет весьма существенный наклон, обуславливающий равномерное увеличение спектральной плотности с ростом частоты (см. рис. 2, б). Т.е. здесь мы имеем эффект, физически аналогичный использованию, например, нелинейных степенных или логарифмических развёрток в виброрейсе [2].

Для последовательностей ЛИП временную функцию, определяющую закон изменения относительной амплитуды кодоимпульсного сигнала в соответствие с условием (2), можно представить следующим образом:

$$A_{\text{имп}}(t) \sim [T_0 + [(T_{N-1} - T_0) / T] t]^p \quad (5)$$

где  $T_0$  - начальный период следования,  $T_{N-1}$  - конечный период следования.

Заменив в выражении (5) аргумент  $t$  на аргумент  $t_n$ , соответствующий временному положению импульсов функции кода ЛИП в зависимости от их порядкового номера  $n$ , и воспользовавшись уравнением функции кода последовательностей ЛИП, можно задать относительную амплитуду произвольного импульса в развёртке.

$$A_{\text{имп}}(n) \sim \left\{ T_0 + [(T_{N-1} - T_0) / T] [n T_0 - n(n-1) \Delta T / 2] \right\}^p \quad (6)$$

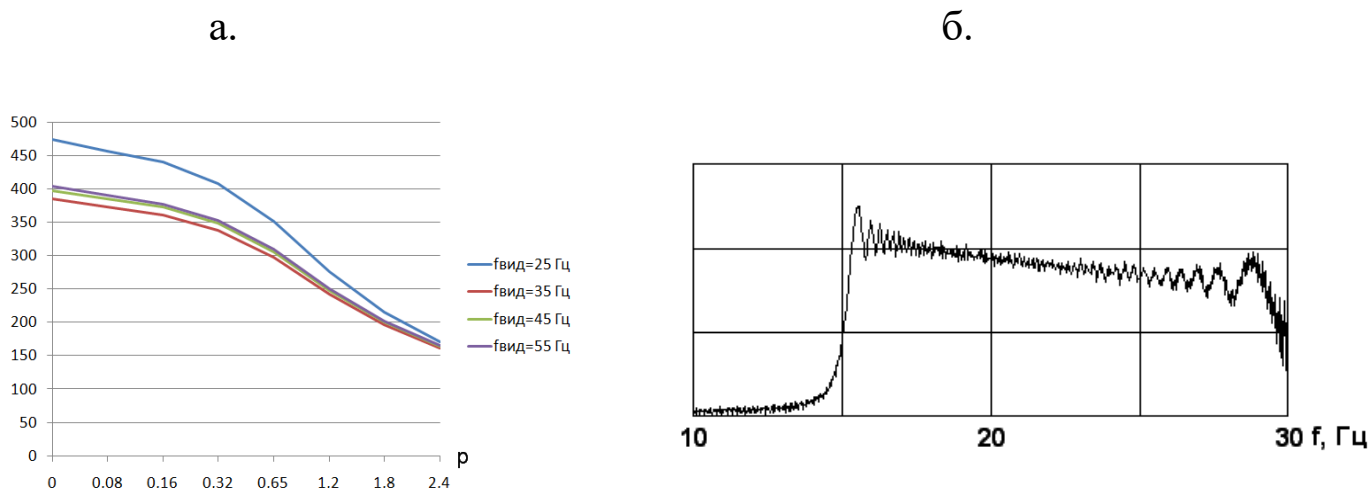


Рис. 3. Влияние амплитудной неидентичности импульсов в кодоимпульсной развёртке ЛИП на динамику ФВК последовательности ( $F_{max} = 30$  Гц,  $T = 20$  с,  $N = 401$ )  
 а – зависимость амплитуды ФВК от  $p$ ; б – спектр ФВК функции кода ЛИП.

Результаты проведённого моделирования показали, что при использовании наиболее эффективной для нефтегазовой сейсморазведки кодоимпульсной последовательности ЛИП ( $F_{max} = 30 - 40$  Гц,  $T = 20-30$  с) неидентичность импульсов в развёртке, определяемая степенной функцией (б), практически не влияет на форму главного максимума ФВК и соответствующего ей спектра даже при повышенных значениях параметра  $p$ , равных 0,32 -0,65. Выполненные расчёты показали также, что при значениях параметра  $p \leq 0,65$ , неидентичность импульсов в развёртке весьма не существенно влияет на уровень помех преобразования и в дальней зоне корреляционной функции (см. таблицу №3).

Таблица №3

Значения динамического диапазона корреляционного преобразования импульсных последовательностей ЛИП в децибеллах на временах, кратных 0,5 с в зависимости от параметра  $p$  ( $F_{max} = 30$  Гц,  $T = 20$  с,  $N = 401$ ,  $f_{вид} = 55$  Гц)

№	Значения $p$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
1	$p = 0$	42,02	49,98	53,00	53,63	52,52	55,78	53,81	54,33	55,33	56,64
2	0,08	41,90	49,88	52,91	53,56	52,51	55,76	53,85	54,40	55,37	56,71
3	0,16	41,77	49,77	52,82	53,49	52,49	55,74	53,89	54,47	55,41	56,78
4	0,32	41,49	49,52	52,61	53,33	52,45	55,68	53,97	54,61	55,47	56,91
5	0,65	40,85	48,91	52,11	52,95	52,32	55,51	54,11	54,89	55,59	57,16
6	1,2	39,65	47,72	51,10	52,19	52,04	55,13	54,29	55,31	55,73	57,48
7	1,8	38,22	46,31	49,88	51,24	51,63	54,63	54,38	55,67	55,81	57,70
8	2,4	36,78	44,89	48,65	50,27	51,17	54,10	54,38	55,93	55,85	57,81

Таким образом, динамика корреляционных функций для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИП практически не искажается при амплитудной неидентичности импульсов в развёртке, определяемой степенной функцией (б), при условии  $p \leq 0,65$ , т.е. при  $\approx 2$ -х кратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне 10 - 30 Гц. Вместе с тем очевидно, что для последовательностей ЛИП, также как и для кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, уменьшение амплитуды воздействий по мере увеличения частоты следования приведёт к снижению помехоустойчивости метода по отношению к некогерентным помехам.

Так, на рис.3,а представлены графики пиковой амплитуды главного максимума ФВК эффективной импульсной последовательности ЛИП в зависимости от параметра  $p$ , рассчитанные для импульсов с различной преобладающей частотой  $f_{\text{вид}}$ . Из рисунка 3,а можно видеть, что при двухкратном уменьшении амплитуды импульсов по мере увеличения частоты следования от 10 Гц до 30 Гц, т.е. при  $p = 0,65$ , амплитуда ФВК, а значит и помехоустойчивость метода, уменьшается в  $\approx 1,36$  раза для  $f_{\text{вид}} = 25$  Гц, и в  $\approx 1,33$  раза для  $f_{\text{вид}} = 35 - 55$  Гц. Скомпенсировать указанное снижение помехоустойчивости метода представляется возможным путём увеличения кратности накопления колебаний на  $\approx 80$  %, что приведёт к существенному снижению производительности работ.

В качестве приемлемого компромисса для кодоимпульсного излучателя, используемого для формирования последовательностей ЛИП, следует, по-видимому, рассматривать амплитудную неидентичность импульсов в развёртке, соответствующую значениям параметра  $p \leq 0,32$ .

При сопоставлении графиков, приведённых на рис. 2, а и 3, а, интересным представляется то обстоятельство, что если амплитуда главного максимума ФВК при использовании кодоимпульсных сигналов ЛИЧ может существенно возрасти по мере увеличения преобладающей частоты импульсов  $f_{\text{вид}}$ , то при использовании развёрток ЛИП более высокоамплитудный максимум ФВК формируется для низкочастотного 25-герцового импульса. Физически это связано с тем, что значения спектральной плотности функции кода при увеличении частоты существенно возрастают для развёрток ЛИЧ и несколько уменьшаются при использовании последовательностей ЛИП (см. рис. 2, б и 3, б).

Повысить эффективность кодоимпульсного метода можно путём применения двухполярных импульсных последовательностей, позволяющих существенно уменьшить интенсивность корреляционного фона при кодоимпульсном накоплении. Наибольший интерес для сейсморазведки представляют двухполярные дополнительные последовательности, при использовании которых корреляционный фон в идеальной ситуации полностью обнуляется [1].

Импульсные последовательности  $F_n(t)$  и  $'F_n(t)$  называются дополнительными, если им соответствуют функции кода  $K(t)$  и  $'K(t)$ , для которых выполняется условие

$$U_0(\tau) + 'U_0(\tau) = \begin{cases} 2 & \text{при } \tau=0, \\ 0 & \text{при } \tau = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1), \end{cases} \quad (7)$$

где  $U_0(\tau)$  и  $'U_0(\tau)$  – нормированные ФАК функций  $K(t)$  и  $'K(t)$ .

Т.е. для таких последовательностей сумма ФАК функций кода равна нулю везде, кроме  $\tau=0$ . При этом каждая функция кода дополнительных последовательностей состоит из одинакового чётного числа импульсов Кронекера, следующих через равные интервалы и имеющих амплитуды  $+1$  или  $-1$ .

Как уже отмечалось, дополнительные последовательности относятся к классу так называемых двухполярных последовательностей. Вместе с тем используемые в сейсморазведке импульсные излучатели являются излучателями одностороннего действия. Украинскими геофизиками был предложен весьма простой способ, позволяющий формировать двухполярные последовательности излучателями одностороннего действия [4]. В предложенном способе разнополярную последовательность импульсов реализуют односторонними воздействиями за два сеанса. Сначала возбуждается развёртка, соответствующая временному закону следования импульсов с положительной полярностью, затем развёртка, соответствующая закону следования импульсов с отрицательной полярностью. Вычитая вторую запись из первой, получают аналог виброграммы, которая бы регистрировалась при использовании кодоимпульсных излучателей двухстороннего действия силы.





1.

2.

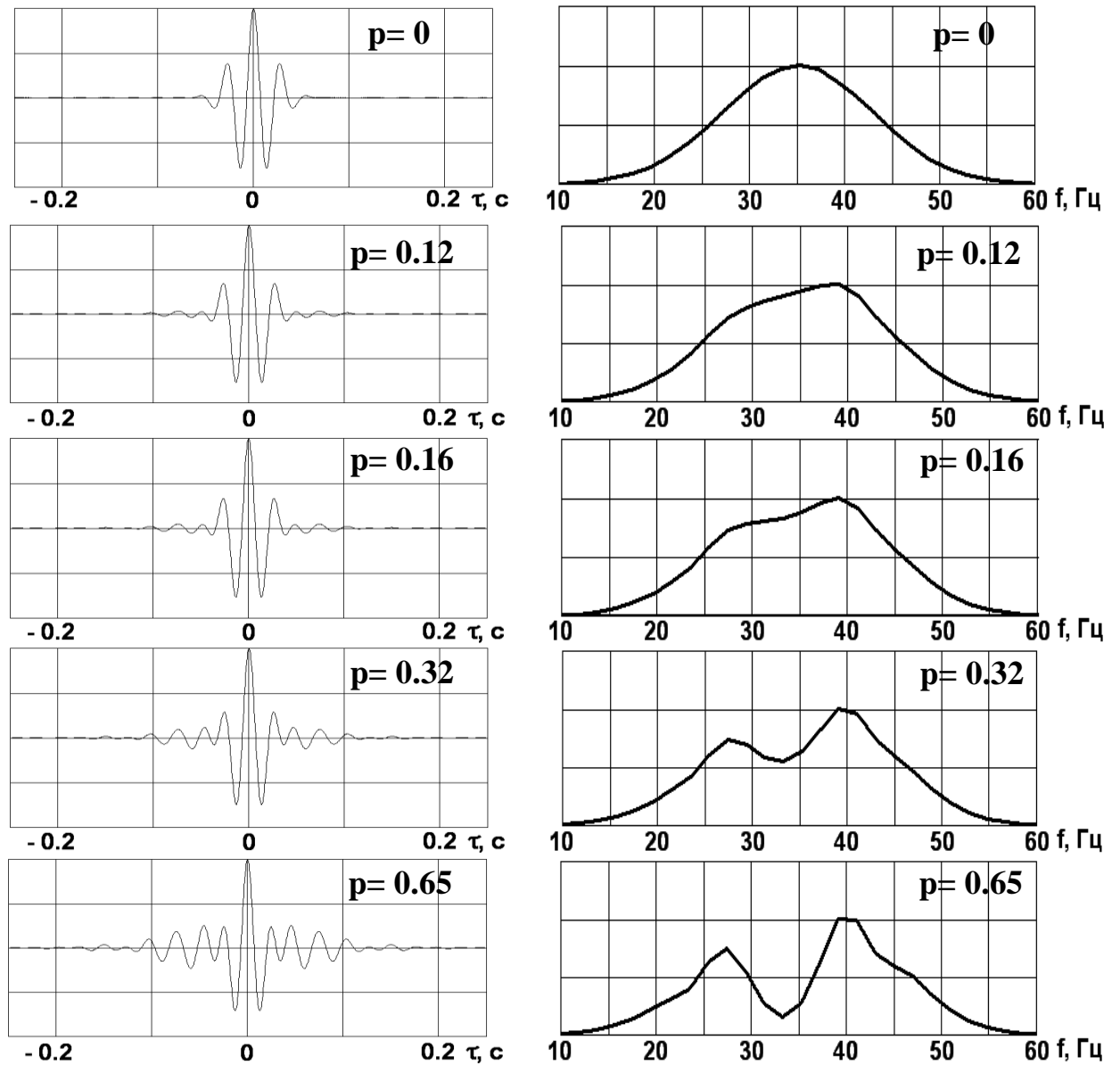


Рис. 4. ФВК (1) и амплитудные спектры главных максимумов ФВК (2) двухполярных импульсных дополнительных последовательностей, сформированных путём поочерёдной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью ( $f_{\text{вид}} = 35$  Гц)

При кодоимпульсном накоплении колебаний с использованием дополнительных последовательностей не следует также полностью исключать принципиальную возможность некоторого различия между амплитудами импульсов с положительной и отрицательной полярностью. Подобная модель амплитудной неидентичности импульсов в двухполярных развёртках будет в свою очередь приводить к некоторым искажениям корреляционных функций используемых сигналов. Так, на рис. 5 показаны главные максимумы ФВК дополнительных последовательностей, рассчитанные при различных соотношениях амплитуд импульсов с положительной ( $A_+$ ) и отрицательной ( $A_-$ ) полярностью. Из рис. 5 можно видеть, что даже при условии  $(A_+)/ (A_-) = 0.7$  искажения главного максимума ФВК дополнительной последовательности крайне не значительны. Однако в этом случае значения динамического

диапазона корреляционного преобразования сигнала становятся существенно меньшими по сравнению с аналогичными значениями для эффективных однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП, что исключает одно из основных преимуществ двухполярных дополнительных последовательностей. Высокую эффективность применения дополнительных последовательностей можно обеспечить уже при условии  $(A_+)/ (A_-) \geq 0.8$ . В этом случае динамический диапазон  $D(\tau)$  для дополнительных последовательностей на 10 – 26 дБ превышает аналогичные значения для эффективных однополярных последовательностей ЛИЧ.

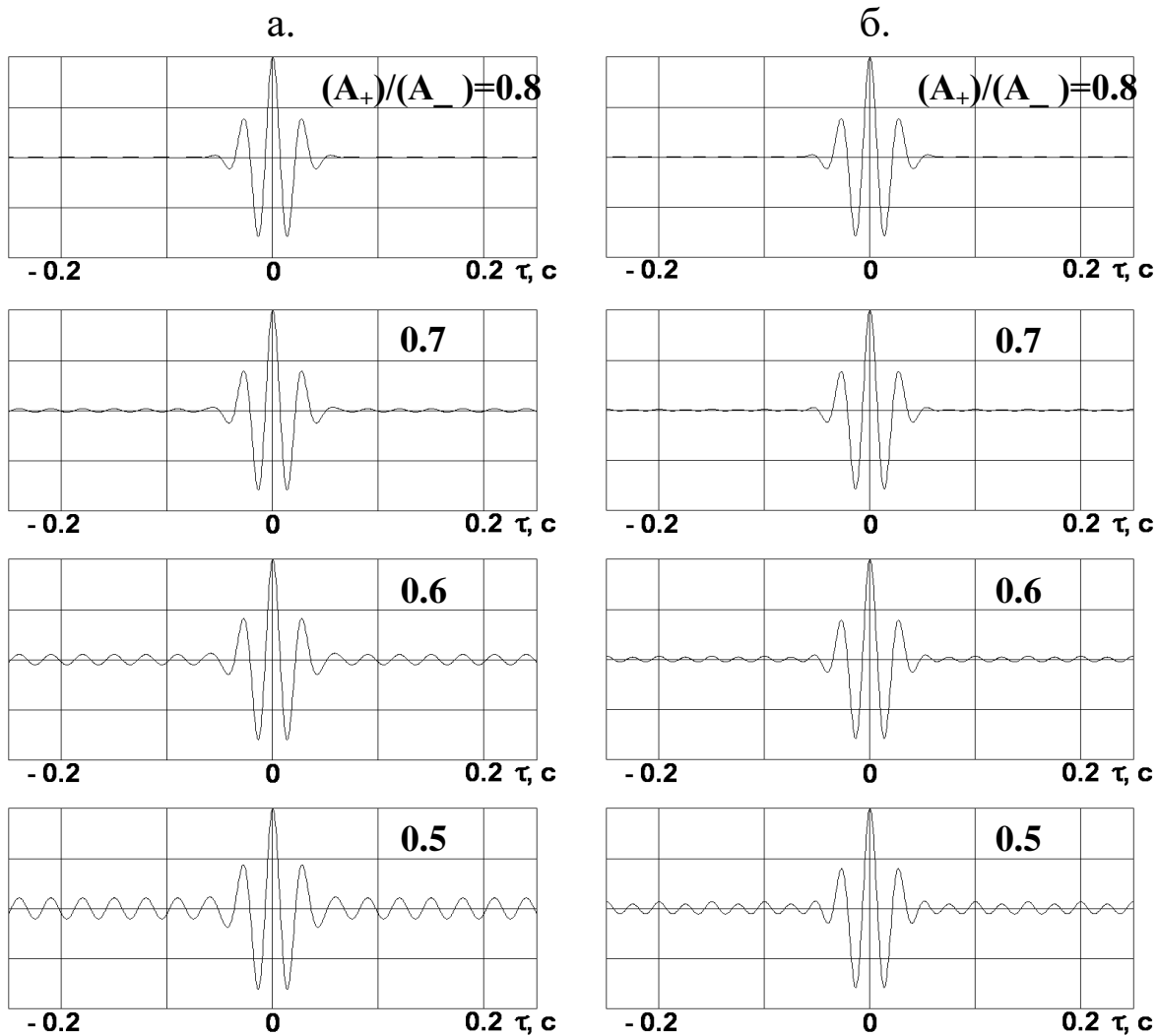


Рис. 5. Главные максимумы ФВК дополнительных последовательностей, сформированных при различных соотношениях между амплитудами импульсов с положительной ( $A_+$ ) и отрицательной ( $A_-$ ) полярностью ( $f_{\text{вид}}=35$  Гц,  $N=256$ )

а -  $\tau_0 = 30$  мс; б -  $\tau_0 = 50$  мс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. При использовании скосов помехи преобразования кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, так же, как и при огибании вибросейсмических сигналов, в большей степени ослабляются в ближней зоне ФВК, на временах  $\tau \leq 1$  с. Величина ослабления помех в этой области ФВК достигает 3 дБ при  $t_{\text{ск}} = 0,1T$ . Для наиболее эффективных кодов ЛИП огибание краевых частей импульсных последовательностей приводит к существенному увеличению эффективной длительности корреляционных импульсов и делает не целесообразным использование скосов.

2. В результате совместного применения для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ ( $F_{\max} = 80$  Гц) скосов и комбинированных разверток ЛИЧ, состоящих из четырех сегментов, отличающихся друг от друга значениями  $F_{\min}$ , динамический диапазон корреляционного преобразования при кодоимпульсном накоплении во временном окне  $\tau = 0,5-4,0$  с достигает в среднем 58 дБ при  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц и 47 дБ при  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц.

3. Среднее значение динамического диапазона преобразования наиболее эффективных последовательностей ЛИП в интервале  $\tau = 0,5-4,0$  с достигает в случае использования комбинированных сигналов, состоящих из четырех сегментов различной длительности, 54 дБ для значений  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц и 58 дБ для  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц. При использовании же комбинированных сигналов, состоящих из восьми разверток ЛИП различной длительности, аналогичные средние значения динамического диапазона преобразования увеличиваются соответственно до 57,0 и 60 дБ.

4. Динамика корреляционных функций для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ практически не искажается при амплитудной неидентичности импульсов в развёртке, определяемой степенной функцией (2), при условии  $p \leq 0,32$ , т.е. при двух кратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне 10-80 Гц. Вместе с тем уменьшение амплитуды возбуждаемых импульсов по мере увеличения частоты следования приводит к снижению помехоустойчивости метода по отношению к некогерентным помехам. В качестве приемлемого компромисса при формулировании технического задания на излучатель, используемый для формирования кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, следует, по-видимому, рассматривать амплитудную неидентичность импульсов в развёртке, соответствующую значениям параметра  $p \leq 0,16$ . При  $p = 0,16$  амплитуда импульсов в диапазоне частот от 10 до 80 Гц изменяется в  $\approx 1,4$  раза.

5. Динамика корреляционных функций для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИП практически не искажается при амплитудной неидентичности импульсов в развёртке, определяемой степенной функцией (2), при условии  $p \leq 0,65$ , т.е. при  $\approx 2$ -х кратном уменьшении амплитуды импульсов в частотном диапазоне 10 - 30 Гц. В качестве приемлемого требования к кодоимпульсному излучателю, используемому для формирования последовательностей ЛИП, следует, по-видимому, рассматривать амплитудную неидентичность импульсов в развёртке, соответствующую значениям параметра  $p \leq 0,32$ . В этом случае помехоустойчивость метода, может снижаться не более, чем в 1,14 раза для  $f_{\text{вид}} = 25 - 55$  Гц.

6. Дополнительные последовательности, формируемые путём раздельной отработке импульсов с положительной и отрицательной полярностью, отличаются качественной динамикой корреляционных импульсов при  $p \leq 0,12-0,16$ , т.е. при условии если в частотном диапазоне развёртки 10 – 80 Гц амплитуда импульсов изменяется не более чем в 1,3- 1,4 раза, или же в частотном диапазоне развёртки 10-30 Гц не более чем в 1,15 – 1,2 раза. Динамический диапазон корреляционного преобразования в этом случае составляет для указанных развёрток в интервале  $\tau = 0,5 - 5,0$  с не менее 59,41 – 67,66 дБ

7. Для дополнительных последовательностей при соотношении амплитуд импульсов с положительной и отрицательной полярностью  $(A_+)/ (A_-) = 0.7$  искажения главного максимума ФВК крайне не значительны. Однако в этом случае значения динамического диапазона корреляционного преобразования сигнала становятся существенно меньшими по сравнению с аналогичными значениями для эффективных однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП. Высокую эффективность применения дополнительных последовательностей можно обеспечить уже при условии  $(A_+)/ (A_-) = 0.8$ . В этом случае динамический диапазон  $D(\tau)$  для дополнительных последовательностей на 10 – 26 дБ превышает аналогичные значения для однополярных последовательностей ЛИЧ.

## 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., Королюк 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.

## АННОТАЦИЯ

На основании модельных исследований обсуждается возможность повышения эффективности применения в сейсморазведке однополярных кодоимпульсных сигналов путём огибания кодовых функций и применения комбинированных кодоимпульсных сигналов. В результате совместного применения для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ ( $F_{\max} = 80$  Гц) скосов и комбинированных разверток, состоящих из четырех сегментов, динамический диапазон корреляционного преобразования при кодоимпульсном накоплении во временном окне  $\tau = 0,5-4,0$  с достигает в среднем 58 дБ при  $f_{\text{вид}} = 55$  Гц и 47 дБ при  $f_{\text{вид}} = 35$  Гц. Для последовательностей ЛИП аналогичные значения, при использовании комбинированных сигналов, состоящих из четырёх сегментов, составляют 58 и 54 дБ, а в случае восьми сегментов соответственно 60 и 57 дБ.

Рассматривается также влияние амплитудной неидентичности импульсов в развёртках на эффективность кодоимпульсного метода сейсмической разведки.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сейсморазведка, кодоимпульсный метод, комбинированные сигналы, скосы, неидентичность импульсов, помехоустойчивость, корреляционный фон, спектры, эффективная длительность.

### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Юрий Петрович *КОСТРЫГИН* – генеральный директор ООО «Новоросморгео», доктор технических наук.

Дмитрий Алексеевич *КОЛЕСНИКОВ* – инженер-геофизик ООО «Новоросморгео»

Контакты просим осуществлять через Кострыгина Ю.П.:

Адрес: 350089, г. Краснодар, проспект Чекистов, 16, кв. 237.

Тел. 8-918-135-87-30 или 8-861-261-26-87.

Е-mail: [kostr\\_p@mail.ru](mailto:kostr_p@mail.ru)