



## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МОГТ 2D

А. П. Сысоев

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

При выполнении сейсмических наблюдений 2D сейсмограммы общего пункта взрыва представляются дискретной функцией двух переменных: времени и удаления приемник–источник. При регистрации волнового поля одиночными сейсмоприемниками с малым расстоянием между ними (*UniQ*-технология) преследуются две цели: сохранение высоких частот отраженных сигналов за счет исключения эффекта микростатики и выполнение теоремы отсчетов Котельникова при дискретизации непрерывного поля по пространственной переменной, тем самым исключая эффект пространственного аляйсинга регулярных волн-помех. Это позволяет на этапе цифровой обработки более эффективно решать задачи выделения полезных сигналов и подавления помех. Принимая в целом идею плотной установки приемников, предлагается оптимизировать профильную систему наблюдения по шагу пунктов регистрации и возбуждения путем сочетания аналогового и цифрового группирования сейсмоприемников. Пространственная дискретизация поля в этом случае определяется расстоянием между центрами групп приемников, а параметры аналого-цифрового группирования рассчитываются из условия подавления пространственных аляйсинговых частот. На основе анализа статических поправок, полученных при обработке ранее проведенных сейсмических исследований, предложен способ оценки влияния латеральных вариаций микростатики на результаты аналогового группирования.

**Ключевые слова:** система наблюдений 2D, цифровое и аналоговое группирование, микро статика, пространственный аляйсинг.

## JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF THE 2D CDP FIELD SYSTEM

A. P. Sysoev

A.P.Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russia

When performing seismic observations, 2D seismograms of a common shot point are represented as a discrete function of two variables, i.e. time and receiver–source offset. When recording a wave field using single seismic receivers placed small distance apart (*UniQ* technology), two goals are pursued: maintaining high frequencies of reflected signals by eliminating the effect of microstatics and fulfilling the Kotelnikov sampling theorem when discretizing a continuous field with respect to a spatial variable, thereby eliminating the effect of spatial aliasing of regular interference waves. At the stage of digital processing, this allows to solve the problem of extracting useful signals and suppressing noise more effectively. Taking the idea of a close array of receivers as a whole, it is proposed to optimize the profile observation system by source–receiver spacing combining analog and digital grouping of seismic receivers. In this case, the spatial sampling of the field is determined by the distance between the centers of receiver groups, and the parameters of the analog–digital grouping are calculated from the condition of suppressing spatial aliasing frequencies. Based on the analysis of static corrections obtained during processing of previous seismic studies, a method is proposed for assessing the effect of lateral microstatics variations on the results of analog grouping.

**Keywords:** 2D observation system, digital–analog grouping, microstatics, spatial aliasing.

DOI 10.20403/2078-0575-2020-3-59-65

В последние годы в геофизической литературе активно обсуждается *UniQ*- или *Q*-технология регистрации поля отраженных волн одиночными приборами с расстоянием между каналами 2–5 м, эквивалентным расстоянию между приборами аналоговой группы [1, 2, 4, 9]. Утверждается, что такая методика наблюдений обладает рядом уникальных особенностей:

1. Регистрация одиночными приборами исключает эффект «микростатики». Группирование приборов в цифровой форме после коррекции статических поправок исключает эффект подавления высокочастотной составляющей отраженных сигналов, что может иметь место при регистрации распределенной по линии профиля группы приборов.

2. Исключается эффект пространственного аляйсинга, что повышает эффективность подавления регулярных помех.

3. Формирование потока информации на один-два порядка больше, чем при традиционных методах полевых работ.

Добавим к этому следующее рациональное соображение: увеличением числа активных приемников, как отмечено в работе [5], обеспечивается более полное использование энергии источника.

Анализ преимуществ *UniQ*-технологии начнем с третьего утверждения. К. Шеннон, заложивший основы теории информации, рассматривает информацию как снятую неопределенность наших знаний об объекте исследования. Поэтому при увеличении числа регистрирующих каналов правильнее говорить о порядке увеличения объема данных, которые могут увеличить или не увеличить количество информации об изучаемом объекте сравнительно со стандартной методикой наблюдения. Вполне до-



пустим вариант, при котором весь эффект сводится только к кратному увеличению объема данных без увеличения количества информации.

В общем случае при аналоговом накоплении сигналов группой приборов, распределенной по линии наблюдения, возможно частичное подавление высокочастотных составляющих спектра сигналов отраженных волн сравнительно с цифровым группированием, выполняемым после коррекции статических поправок [8]. Но этот эффект в общем случае не имеет смысла оценивать, поскольку он определяется локальными вариациями параметров верхней части разреза (ВЧР), проявляющимися в пределах базы группы, и зависит от характера неоднородности и линейных размеров группы. Уникальным результатам съемки с одиночными приборами можно противопоставить столь же уникальные результаты, полученные с применением базы группирования, равной 25 м. Также следует учитывать, что латеральная неоднородность ВЧР в принципе порождает спектральную неидентичность пунктов приема, которая проявляется прежде всего в высокочастотной части спектра и теоретически компенсируется процедурами поверхностно-согласованной деконволюции, предназначенной для компенсации влияния неоднородности ВЧР.

Следует признать, что регистрация с соблюдением условий *UniQ*-технологии в силу выполнения теоремы отсчетов Котельникова обладает свойством полноты представления волнового поля, что позволяет адаптировать методику обработки к его особенностям. Но для реализации этой методики наблюдения необходимо многократно увеличить число каналов сейсмической станции. Методология такой съемки противоположна ранним работам МОВ, когда задача выделения отраженных волн решалась на уровне оптимизации параметров регистрации [3], включая аналоговое группирование приборов и аппаратурное смещение каналов. Применяемые в настоящее время параметры приемной расстановки занимают промежуточное положение между двумя отмеченными вариантами и устанавливаются либо на основании опыта предшествующих работ, либо на идеях совершенствования апробированных методик на основании общих соображений.

В настоящей работе сделана попытка формализовать задачу подбора параметров системы полевых наблюдений с точки зрения теории дискретизации непрерывных последовательностей. Для начального варианта обсуждения этой проблемы будем рассматривать только профильные наблюдения МОГТ.

Система наблюдений 2D определяется параметрами расстановки общего пункта возбуждения (ОПВ), шагом ПВ по профилю и определяется следующим списком параметров:  $\Delta_s$ ,  $\Delta_r$  – шаг пунктов взрыва и приема (ПП) по линии профиля;  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$  – минимальное и максимальное удаление ПП–ПВ.

Соответственно, число каналов расстановки  $L = (L_{\max} - L_{\min}) / \Delta_r + 1$ .

Следующая группа параметров определяет способ получения одноканальной записи:  $\Delta_r$  – шаг расстановки приборов в группе;  $N$  – число приборов в группе;  $\Delta_t$  – шаг дискретизации по времени.

Сейсмограмма ОПВ определяется как двумерная дискретная функция непрерывного волнового поля. В общем случае, перед тем как выполнить дискретизацию, волновое поле подвергается низкочастотной фильтрации по пространственной переменной  $x$ , реализуемой линейной группой приборов  $Q(x)$  и по переменной  $t$  – антиалейсинговым фильтром  $\theta(t)$ :

$$U(x, t)Q(x)\theta(t) \Rightarrow f(n\Delta_x, k\Delta_t).$$

**Максимальное удаление ПП–ПВ.** Его значение обосновать достаточно просто. С одной стороны, для оценки эффективной скорости отраженных волн необходимо обеспечить длину годографа ОГТ не менее глубины целевых отражающих горизонтов, с другой – максимальное удаление ограничено сверху значением кинематического мьютинга.

Введем параметр, характеризующий отношение приращения времен отражения на нулевом удалении и удалении ПВ–ПП  $l$ , который определяется как коэффициент растяжения сигнала при вводе кинематики:

$$k = dt_0 / dt_l = \frac{1}{dt_l / dt_0} = \frac{\sqrt{t_0^2 + (l/v)^2}}{t_0}.$$

Выразим удаление и начальное время обнуления кинематическим мьютингом трасс сейсмограммы ОГТ как функцию коэффициента растяжения:

$$l_m = vt_0 \sqrt{k^2 - 1}; \quad t_m(l_m) = \sqrt{t_0^2 + (l_m/v)^2}. \quad (1)$$

В уравнении (1) кинематические параметры отраженной волны можно заменить на эффективную глубину отражающей границы  $2h = vt_0$ , тогда

$$l_m = 2h \sqrt{k^2 - 1}.$$

Линия кинематического мьютинга для сейсмограмм ОГТ с введенной кинематикой описывается линейной функцией глубины отражения. На практике коэффициент растяжения ограничивается значением  $k \leq 1,3$ , что соответствует  $l_m < 1,6h$ .

**Кратность системы наблюдений.** Увеличение объема выборки является общим способом уменьшения погрешности оценки параметров волнового поля. Для сейсмических наблюдений это условие соответствует увеличению плотности наблюдения (не кратности выборки общей срединной точки (ОСТ), а плотности, определяемой количеством трасс на единицу длины профиля).

Объем выборки (кратность) сейсмограммы ОСТ определяется известным выражением  $kr = L\Delta_r / 2\Delta_s$ . Для определения плотности наблюдений  $p$  нормируем значение кратности на шаг ОСТ ( $\Delta_r / 2$ ):

$$p = 2kr/\Delta_r = L/\Delta_s.$$

Увеличение плотности наблюдения достигается уменьшением шага либо ПВ, либо ПП; последнее соответствует увеличению числа каналов  $L$  при фиксированной длине расстановки. В качестве примера рассмотрим три варианта системы наблюдения с одинаковой плотностью: 1) шаг ПВ – 50 м, ПП – 50 м; 2) 100 и 25; 3) 200 и 12,5.

При фиксированной базе наблюдения система № 1 с равным шагом ПВ и ПП обеспечивает максимальную кратность выборки ОСТ. Системы 2, 3 характеризуются последовательным прореживанием пунктов возбуждения при одновременном сгущении пунктов приема и общих срединных точек (ОСТ). Сравнительный анализ систем наблюдения необходимо проводить с привязкой к конкретным геофизическим задачам, решаемым при обработке сейсмических данных.

Основных задач немного:

**Скоростной анализ.** Выполняется по суперсейсмограммам ОСТ, поэтому при одинаковой линейной базе суперсейсмограммы объемы выборки трасс и структура удалений ПП–ПВ одинаковы для всех систем.

**Коррекция статических поправок.** Различие в условиях задачи определяется только пропорциональным увеличением кратности по выборкам ОПВ и уменьшением – по выборкам ОПП. Тем не менее объемы выборок по ОПП остаются значительными для оценки среднего значения сдвигов по этой переменной.

**Подавление волн-помех с линейным годографом.** Это преобразование выполняется по сейсмограммам ОПВ алгоритмами типа веерной фильтрации. Сгущение ПП уменьшает эффект пространственного аляйсинга, что повышает эффективность процедуры подавления помех.

**Суммирование по ОСТ.** Получение временных разрезов ОСТ простым суммированием является промежуточным этапом обработки, поэтому для получения эквивалентных результатов для всех типов расстановки как вариант можно выполнить низкочастотную пространственную фильтрацию суммарных разрезов

Основной этап обработки – миграция, которая реализует накопление сигналов по кинематике дифрагированных волн. Накопление сигналов выполняется в пространстве двух координат поля времен ( $x, l$ ). При одинаковой плотности наблюдений выполняется условие равенства количества трасс в пределах апертуры миграции.

**Дискретизация по времени.** Из опыта можно принять, что верхняя граничная частота сейсмических данных МОВ не превышает 150 Гц, поэтому шаг дискретизации 2 мс является достаточным и теоретически обоснованным. Но в справочнике [8] утверждается, что в силу ограниченности сейсмических трасс по времени «для передачи сейсмических сигналов с искажениям, не превышающими

3 Дб» квантование должно выполняться с шагом, вдвое меньшим, чем предписывается теоремой отсчетов. В работе [9] справедливость этого утверждения иллюстрируется изображениями сейсмограммы с разным шагом дискретизации, но без пояснения алгоритма интерполяции трасс, использованного при построении изображений. Существенно, что при обработке сейсмических данных приходится многократно решать задачу интерполяции дискретных последовательностей, а уменьшение шага дискретизации позволяет использовать более простые в вычислительном отношении алгоритмы интерполяции. Поэтому выбор шага квантования не определяется формальным выполнением теоремы отсчетов.

Отметим, что при регистрации волнового поля основное требование теоремы отсчетов (подавление шумов выше верхней граничной частоты сейсмических волн) выполняется неукоснительно.

**Пространственный аляйсинг.** Рассмотрим гармоническую составляющую волны с кажущейся скоростью  $v_k$ :

$$\begin{aligned} \cos(w(t - x_l/v_k)) &= \cos(wt - w/v_k x_l) = \\ &= \cos(wt - u_k \Delta_r l). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $u_k = w/v_k$  – волновое число,  $l$  – номер канала расстановки ОПВ. Пространственная частота Найквиста определяется шагом квантования по оси  $x$ :

$$q_N = 1/(2\Delta_r) [1/м]; u_N = \pi/\Delta_r [рад/м]. \quad (3)$$

Потребуем, чтобы волновое число превышало частоту Найквиста:

$$u_k = u_N + u_0 = \pi/\Delta_r + u_0. \quad (4)$$

Подставим (4) в формулу (2) и выполним преобразование с использованием формул приведения тригонометрических функций:

$$\cos(wt - (u_N + u_0)\Delta_r l) \equiv \cos(wt - (-u_N + u_0)\Delta_r l).$$

Получено тождество, из которого следует, что гармоника с пространственной частотой  $(u_N + u_0)$  отображается в области отрицательных пространственных частот  $(-u_N + u_0)$  двумерной спектральной плоскости и визуально воспринимается как волновой пакет с отрицательной кажущейся скоростью  $v_k^* = w/(-u_N + u_0)$ . Наглядные иллюстрации этого эффекта приведены в работе [7].

При обосновании шага дискретизации по времени мы принимаем, что спектр трасс ограничен спектром сейсмического сигнала, уверенно можем определить самую оптимистичную оценку верхней граничной частоты сигнала и, в соответствии с теоремой отсчетов, определить шаг дискретизации и параметры антиаляйсингового фильтра. Верхняя пространственная граничная частота волнового поля определяется поверхностными сейсмогеологическими условиями, типом источника, уровнем регулярных и случайных помех и может изменяться в широких пределах даже на сейсмограммах одного



профиля. На практике при обосновании шага ПП выполнение теоремы отсчетов для пространственных частот игнорируется. На рис. 1 представлены два квадранта двумерного спектра реальной сейсмограммы. По временной частоте регистрируемая полоса частот волнового поля заведомо ниже частоты Найквиста, по горизонтали – пространственная частота Найквиста, определяемая на графике значением 0,5, обрезает спектр волнового поля.

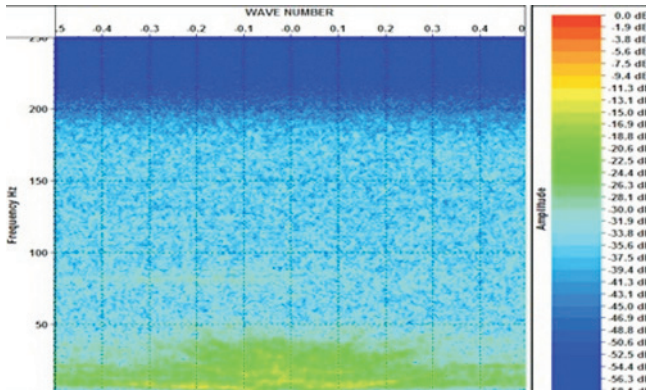


Рис. 1. Двумерный спектр волнового поля сейсмограммы ОПВ

В случае высокого отношения сигнал/помеха волновое поле определяется детерминированной составляющей. В этом случае основным инструментом выделения сигналов является направленное суммирование по выборке ОСТ (оценка среднего значения выборки отсчетов) до или после миграции и эффекты пространственного аляйсинга несущественны.

Для сейсмограмм с низким отношением сигнал/помеха важной составляющей процесса обработки являются процедуры подавления помех по сейсмограммам ОПВ. Эта задача сводится к веерной фильтрации, реализуемой на двумерной спектральной плоскости, поэтому эффекты пространственного аляйсинга ограничивают эффективность решения задачи подавления помех.

**Линейное группирование приборов.** Линейная группа приборов, распределенных по линии профиля, реализует низкочастотную пространственную фильтрацию непрерывного волнового поля до дискретизации по пространственной переменной. Передаточная характеристика линейной группы (рис. 2) с количеством приборов  $N$  определяется выражением [3]:

$$R(u) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jud} \right| = \frac{\sin(u\Delta_r N / 2)}{\sin(u\Delta_r / 2)}. \quad (5)$$

Рассматривая группу как пространственный антиаляйсинговый фильтр, необходимо определить ее параметры, обеспечивающие подавление составляющих волнового поля со значением волнового числа выше пространственной частоты Найквиста (3). Пусть частота  $u_0$  первого нуля передаточной характеристики группы, определяемая из формулы (5)

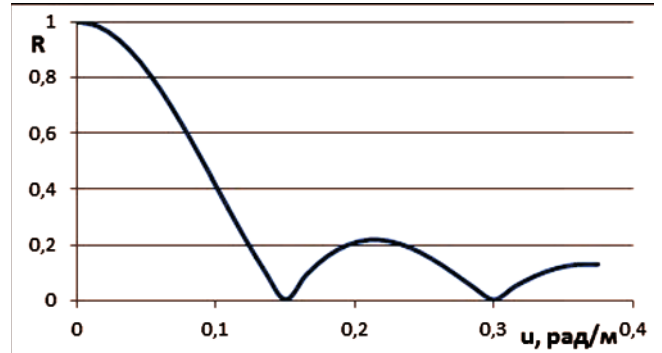


Рис. 2. Передаточная характеристика линейной группы приборов

$$u_0 \Delta_r N / 2 = \pi \Rightarrow u_0 = 2\pi / (\Delta_r N)$$

соответствует пространственной частоте Найквиста  $u_0 = \pi / \Delta_r$ . Из этого условия определяется база группирования приборов:

$$\pi / \Delta_r = 2\pi / (\Delta_r N) \Rightarrow \Delta_r N = 2\Delta_r.$$

Из полученного равенства следует, что формальная база дискретной линейной группы приборов  $\Delta_r N$ , удовлетворяющая условию пространственного антиаляйсингового фильтра, должна составлять удвоенное расстояние между центрами групп  $2\Delta_r$ .

Кроме условия подавления зеркальных частот база линейной группы должна пропускать без искажения полезную составляющую сигнала. Примем, что полоса пропускания определяется значением частотной характеристики  $R(u) > 0,7R(u=0)$ . Численно установлено, что передаточная характеристика группы приборов принимает значение  $R(u)/R(0) > 0,7$  при значении аргумента  $u \leq 0,45u_0 \approx \pi / (N\Delta_r)$ . Следовательно, критерием пропускания полезных отраженных волн группой приборов является выполнение условия

$$\frac{w_{\max}}{v_k} = \frac{2\pi f_{\max}}{v_k} < \frac{\pi}{N\Delta_r} = \frac{\pi}{2\Delta_r} \Rightarrow N\Delta_r = 2\Delta_r < \frac{v_k}{2f_{\max}}.$$

Для отраженных волн кажущаяся скорость  $v_k$  является функцией скорости отраженной волны, вертикального времени и удаления ПП–ПВ. Нетрудно оценить, что для максимального удаления, ограниченного коэффициентом растяжения сигнала (1), кажущаяся скорость определяется выражением  $v_k(t_0) \approx 1,56v(t_0)$ . Так, например, для горизонтов верхней юры Западной Сибири  $v_k \approx 1,56 \cdot 2600 \approx 4000$  м/с. Ограничиваясь частотой сейсмического сигнала сверху значением 100 Гц, определим шаг ПП  $\Delta_r \leq 4000 / 40 = 10$  м при базе группирования приборов 20 м. Для Восточной Сибири кажущаяся скорость для предельного значения удаления значительно выше:  $v_k \approx 1,56 \cdot 5000 \approx 7800$  м/с, следовательно,  $\Delta_r \leq 20$  м. В этом случае группа сейсмоприемников на базе 40 м пропускает без искажения отраженные сигналы в рабочем диапазоне удалений ПП–ПВ.

Отметим, что рассмотренные оценки не являются рекомендациями к выбору параметров систе-

мы наблюдения, а демонстрируют пример согласования шага ПП и базы группирования приборов, настроенных на пропускание сигналов и подавление пространственных зеркальных частот.

Поскольку перекрытие групп приборов на профиле нерационально, для реализации этого решения будем использовать группирование приборов на базе, равной шагу между центрами групп  $\Delta$ , с последующим цифровым суммированием каналов. Чтобы сохранить координаты центров групп при смешении каналов, можно использовать треугольные весовые функции. Как уже отмечено, подобные технологии группирования в сочетании со смесителями каналов непосредственно при регистрации применялись во времена аналоговой регистрации. Основное отличие цифрового смесителя определяется тем, что смешение можно выполнять после коррекции статических поправок, тем самым минимизируя влияние статических сдвигов на высокочастотные составляющие сейсмических сигналов. Также следует отметить, что параметры цифрового фильтра можно варьировать в области двух переменных ( $t_0, x$ ) волнового поля, увеличивая мощность пространственного фильтра в конусе поверхностных помех.

Примем, что шаг расстановки  $\Delta$ , одиночных приборов в технологии *UniQ* и приборов в линейной группе при стандартной методике наблюдений равны. Выделим диапазон пространственных частот, границами которого являются две частоты Найквиста  $[1/(2\Delta_r), 1/(2\Delta_l)]$ . Левая граница определяется расстоянием между центрами групп приборов, правая – шагом расстановки приборов. В этой полосе пространственных частот при аналого-цифровом группировании происходит «ненаправленное» суммирование волнового поля. В технологии *UniQ* эффект подавления можно реализовать алгоритмами типа веерной фильтрации. Теоретически алгоритмы направленного действия более эффективно решают задачу подавления регулярных помех, но различие в решениях выражается только в определенной полосе пространственных частот и определяется шириной этого участка спектра, уровнем энергии данной составляющей поля и его регулярностью. Отсюда следует, что практическое преимущество цифрового группирования в реальных ситуациях может быть незначимым.

**Эффект «микростатики».** Предполагается, что резкие латеральные вариации скоростной модели ВЧР обуславливают вариации статических поправок для каждого приемника группы  $\tau_i$ . В силу этого гармонические составляющие сигналов отдельных приборов характеризуются фазовыми сдвигами  $\varphi_i = \omega\tau_i$  и аналоговое суммирование группой приборов сопровождается подавлением высокочастотной составляющей спектра. Для непосредственной оценки этого эффекта необходимы специальные работы с одиночными приборами с расстоянием, равным шагу приборов в группах, и выполнение анализа вариаций статических поправок в преде-

лах фиксированных линейных интервалов профиля. Можно ожидать, что результаты будут различаться для разных регионов и разных участков площади даже в пределах одного региона. Трудно ожидать, что такого рода работы могут быть проведены, тем не менее, поскольку проблема обозначена, необходимо определить пути ее решения.

Пусть по результатам обработки профиля получены окончательные статические поправки ОПВ  $\tau_n$ , где  $n$  – номер ПП. По определению эти поправки полностью компенсируют и описывают влияние ВЧР на времена прихода отраженных волн. Будем считать, что разброс поправок в пределах малого интервала профиля пропорционален линейному размеру интервала. Дискретная функция статических поправок позволяет получить выборку значений  $\Delta_\tau(n, m) = |\tau_{n+m} - \tau_n|$ , характеризующих диапазон вариаций статических поправок на интервалах  $m\Delta$ , кратных шагу ПП. Среднее значение модуля приращений по линии профиля

$$\bar{\Delta}_\tau(m\Delta_\tau) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} \Delta_\tau(n, m\Delta_\tau) \quad (6)$$

характеризует диапазон изменения статических поправок на интервале  $m\Delta$  профиля.

На рис. 3 представлен график окончательных поправок ОПВ для профиля Восточной Сибири с шагом ПП  $\Delta_\tau = 50$  м. Перепад рельефа по линии профиля составляет 125 м с резкими вариациями статических поправок. На рис. 4 представлен график функции  $\bar{\Delta}_\tau(L)$ , где  $L = m\Delta_\tau$ . Расстояние между ПП составляет 50 м, поэтому значение функции (6) можно рассчитать только для интервалов, кратных этому значению.

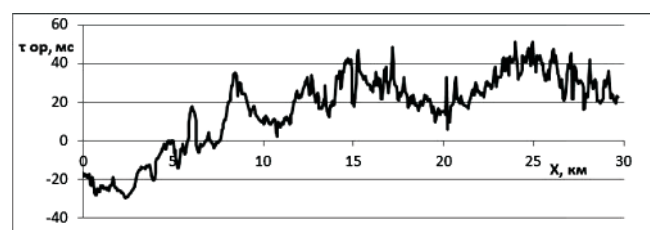


Рис. 3. График статических поправок в пунктах приема по линии профиля

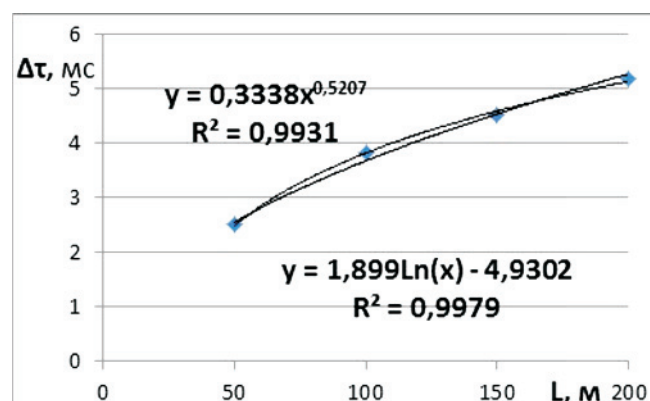


Рис. 4. Оценка диапазона вариации статических поправок как функции интервала профиля

Из рис. 4 следует, что на интервале профиля (базе линейной группы приборов) 50 м диапазон изменения статических поправок оценивается значением около 2,5 мс. Центрируя это значение относительно центра группы, получаем оценку вариации статических поправок  $\pm 1,25$  мс. Для оценки влияния этого фактора на гармонические составляющие пересчитываем временные задержки в фазовые сдвиги  $\delta_\varphi$ , которые определяются как линейная функция частоты  $f$ :

$$\delta_\varphi = w\bar{\Delta}_\tau / 2000 \approx \pm 0,0079f \text{ рад.}$$

Чтобы получить оценку фазовых сдвигов для базы группы меньше 50 м, необходимо выполнить экстраполяцию наблюдений в область малых значений аргумента  $L$ . На рис. 4 представлены графики двух вариантов экстраполирующих функций: степенной и логарифмической, поведение графиков в диапазоне  $L < 50$  м показано на рис. 5. Оптимистичный вариант оценки определяется логарифмической функцией; здесь на интервале 12 м разброс статических поправок равен нулю. Степенная функция показывает нулевой разброс статических поправок только на нулевой базе. Значения этой функции будем использовать как оценку сверху:

$$\bar{\Delta}_\tau(L) = 0,3338L^{0,5207}.$$

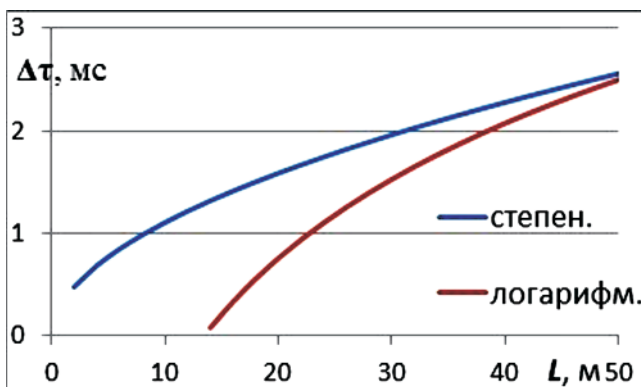


Рис. 5. Экстраполяция оценки диапазона изменения статических поправок

С учетом полученной асимптотики диапазон фазовых сдвигов для базы группы 25 м ограничим значением  $|\delta_\varphi| < 0,0056f$  рад, для базы 12,5 м –  $|\delta_\varphi| < 0,0039f$  рад. Соответственно, на частоте 100 Гц граничные значения сдвигов составят  $|\delta_\varphi| < 0,56$  и  $|\delta_\varphi| < 0,39$  рад. Влияние фазовых сдвигов сигналов отдельных приемников описывается нормированной частотной характеристикой группы приборов

$$Q(\varphi) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\varphi_n) \right|.$$

Пересортировав члены ряда в порядке возрастания фазовой задержки и допуская равномерность последовательности ( $\varphi_n$ ) в диапазоне  $[-\delta_\varphi, \delta_\varphi]$ , можно, аналогично (5), получить аналитическое представление реакции группы на фазовые статические сдвиги как функцию частоты сигнала и диапазона

временной задержки  $\bar{\Delta}_\tau$  (определенной в секундах) на базе группирования приборов

$$Q(f, \bar{\Delta}_\tau) = \frac{\sin(\pi f \bar{\Delta}_\tau)}{N \sin(\pi f \bar{\Delta}_\tau / N)}.$$

В рассматриваемом примере значение  $Q(f, \bar{\Delta}_\tau)$  на частоте 100 Гц и количестве приборов в группе  $N = 7$  составляет 0,95 и 0,975 соответственно для базы группы 25 и 12,5 м. Следовательно, эффектом микростатики можно пренебречь в обоих вариантах расстановки приборов.

## Выводы

Вопрос обоснования методики выполнения сейсморазведочных работ в условиях значительных волн-помех сводится к сопоставлению двух систем наблюдения, в каждой из которых сейсмоприемники устанавливаются непрерывно по профилю с шагом  $\Delta_r$ , обеспечивающим полное покрытие пространственных частот волнового поля. Вопрос о выборе этого параметра оставляем открытым; представляется, что это значение близко к 2 м.

В варианте *UniQ*-технологии каждый приемник определяется как самостоятельный регистрирующий канал  $\Delta_r = \Delta_r$ . В варианте аналого-цифрового группирования необходимо задать шаг между центрами групп и использовать аналоговое группирование  $L = \Delta_r / \Delta_r$ , приемников с соответствующим уменьшением числа регистрируемых каналов. Далее, после коррекции статических поправок база группирования этой системы увеличивается за счет цифрового смещения трасс.

Обе системы регистрации решают проблему пространственного аляйсинга волнового поля, но в первом случае – выполнением условия теоремы отсчетов, а во втором – применением пространственного антиаляйсингового фильтра.

Подавление высоких частот сигнала линейной группой приборов является одним из аргументов в пользу одиночной расстановки приборов. В статье предложен способ оценки этого эффекта по результатам предшествующих работ, позволяющий выполнить численную оценку эффекта «микростатики».

Подбор параметров системы наблюдения, включая высокую плотность расстановки приемников, оптимальное аналоговое группирование приборов в сочетании с цифровым группированием и рациональным соотношением шага ПВ и ПП, следует рассматривать как средство повышения геологической и экономической эффективности сейсморазведочных работ. Увеличение шага ПВ до 100–200 м при соответствующем сокращении шага центров групп до 10–12,5 м представляется обоснованным вариантом методики выполнения профильных наблюдений. Принципиальное сокращение количества источников позволяет повысить производительность полевых сейсморазведочных работ и качество их подготовки, особенно в случае применения взрывных источников возбуждения.





В морской сейсморазведке сопоставляемые методики регистрации реализованы, например, компаниями Western Geco и Sersel [6]. Так, Western Geco выпускает косу «Q–Marine» с одиночными приборами и шагом между каналами 3,125 м. В косе «SEAL Sentinel MS» компании Sersel, приборы распределены равномерно и на базе 12 м объединены в группы по восемь приборов с шагом центров групп 12,5 м. В оборудовании, разрабатываемом АО «Концерн „Океанприбор“», применяется группирование четырех приборов при шаге центров групп 6,25 м. Проблема подавления поверхностных волн в морской сейсморазведке сравнительно с работами на суше не столь существенна, но приведенные примеры показывают, что теоретическое обоснование параметров системы наблюдения при работах на море выполняется значительно корректнее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Аналитическая** служба ЗАО «ГЕОТЕК Холдинг». Повышение эффективности сейсморазведочных работ. Технология UniQ // Нефтегазовая вертикаль. – 2013. – № 5. – С. 49–51.
- Бондарев В. И., Крылатков С. М., Крылаткова Н. А.** Основные этапы развития технологии сейсморазведочных работ на нефть и газ в 20 веке и прогнозе возможных изменений в 21-м веке // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5616>.
- Воюцкий В. С.** О группировании сейсμοприемников // Прикладная геофизика. – 1956. – Вып. 14. – С. 23–46.
- Керусов А. И., Парасына В. С.** Подготовка и особенности крупномасштабных сухопутных сейсмических работ 3D Q-LAND SPARSE-VILID (бассейн Гадамес, Ливия) // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 4. – С. 103–117.
- Лучше** сейсмике 3D – только сейсмика 3D, хорошо спланированная / Е. Козлов, Дж. Боуска, Д. Медведев, А. Роденко // Геофизика. – 1998. – № 6. – С. 3–13.
- Перспективы** АО «Концерн „Океанприбор“» в импортозамещении сейсμοоборудования. – Точка доступа: [www.korabel.ru/news/comments/perspektivy-ao-koncern/oceanpribor-v-importozameschenii-seysmooborudovaniya](http://www.korabel.ru/news/comments/perspektivy-ao-koncern/oceanpribor-v-importozameschenii-seysmooborudovaniya).
- Применение** сейсмогеологического моделирования при проектировании 3D сейсмической съемки в сложных геологических и орографических условиях / С. В. Горбачев, М. В. Губарев, А. В. Дердуга, А. Б. Титов // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 4. – С. 67–75.
- Сейсморазведка.** Справочник геофизика / под ред. И. И. Гурвича, В. П. Номоконова. – М.: Недра, 1981. – 464 с.
- Череповский А. В.** Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. Изд. 2-е, доп. – М.: ООО «EAGE Геомодель», 2017. – 252 с.

#### REFERENCES

- [Analytical service of CJSC “GEOTEK Holding”, Increasing the efficiency of seismic exploration. UniQ Technology]. *Neftegazovaya vertikal*, 2013, no. 5, pp. 49–51. (In Russ.).
- Bondarev V.I., Krylatkov S.M., Krylatkova N.A. [The main stages in the development of seismic technology for oil and gas in the 20th century and the forecast of possible changes in the 21<sup>st</sup> century]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 2. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5616>. (In Russ.).
- Voyutskiy V.S. [On the grouping of seismic receivers]. *Prikladnaya geofizika*, 1956, issue 14, pp. 23–46. (In Russ.).
- Kerusev A.I., Parasyina V.S. [Organization of large-scale land seismic acquisition 3D Q-LAND SPARSE-VIVID (Gadames basin, Libya)]. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2011, no. 4, pp. 103–117. (In Russ.).
- Kozlov E., Bouska Dzh., Medvedev D., Rodenko A. [Better than 3D seismic is only well planned 3D seismic]. *Geofizika*, 1998, no. 6, pp. 313. (In Russ.).
- [Prospects of JSC «Oceanpribor Concern» in import substitution of seismic equipment]. *Perspektivy AO “Kontsern “Okeanpribor” v importozameschenii seysmooborudovaniya*. Available at: <http://www.korabel.ru/news/comments/perspektivy-ao-koncern/oceanpribor-v-importozameschenii-seysmo-oborudovaniya>. (In Russ.).
- Gorbachev S.V., Gubarev M.V., Derduga A.V., Titov A.B. [Seismic-geological modelling for design of 3D survey in complex geological and physiographic conditions]. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2012, no. 4, pp. 67–75. (In Russ.).
- Gurvich I.I., Nomokonov V.P., eds. *Seysmorazvedka. Spravochnik geofizika* [Seismic exploration. Geophysicist Handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 464 p. (In Russ.).
- Cherepovskiy A.V. *Nazemnaya seysmorazvedka novogo tekhnologicheskogo urovnya* [Ground seismic survey at a new technological level]. Moscow, ООО «EAGE Geomodel» Publ., 2017. 252 p. (In Russ.).

© А. П. Сысов, 2020