



В. И. Роман, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
(Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины,
Украина, г. Киев),

Ю. Ш. Закариев, генеральный директор,

С. М. Рябошапко, главный специалист (закрытое акционерное общество
Научно-производственный центр "ГеоСейсКонтроль", Россия, г. Москва),

Д. Н. Гринь, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник,

Н. И. Мукоед, младший научный сотрудник (Институт геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины, Украина, г. Киев)

ИНТЕНСИВНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

Современная нефтегазовая сейсморазведка является интенсивной по темпам работ и производительности наблюдений. Интенсивной в смысле методического и технологического обеспечения качества исследований является адаптивная сейсморазведка.

Ключевым понятием и критерием осуществления адаптивной технологии и основ функционирования автоматизированных адаптивных сейсморазведочных комплексов являются спектры отношения сигнал-помеха целевых сигналов. В понятиях современной сейсморазведки адаптивные исследования являются непрерывными опытно-методическими работами, выполняемыми в пространственно-временных пределах каждого физнаблюдения и, следовательно, в целом на площади исследований. Осуществляемый автоматизированными адаптивными сейсмокомплексами мониторинг условий наблюдений и супервайзинг качества их выполнения делает возможным экономически целесообразное комбинирование высокопроизводительной и высокоточной отработки при соблюдении регламентированного геологическим заданием требования качества исследований.

Ключевые слова: *интенсивная сейсморазведка, адаптивная сейсморазведка, спектры отношения сигнал-помеха целевых сигналов, адаптивная технология, автоматизированный адаптивный сейсморазведочный комплекс.*

Проблемы нынешнего состояния нефтегазовой сейсморазведки обусловлены сменной разведочных ориентиров, вызванной истощением фонда структурных месторождений нефти и газа. Мотивом и стимулом дальнейшего развития и совершенствования сейсморазведки является увеличение объемов детализационных исследований структурных объектов и в равной степени методически и технологически сложных поисков и разведки неструктурных нефтегазоперспективных образований.

Современная нефтегазовая сейсморазведка является интенсивной по темпам

работ и производительности наблюдений. По необходимости столь же напряженной является обработка вала получаемой информации. По существу, современная сейсморазведка с присущим ей размахом производительности и объемов работ при удержании качества наблюдений на грани приемлемой нормы является экстенсивной. Качество наблюдений поддерживается избыточностью средств и систем наблюдений – многоканальной и сверхмногоканальной регистрацией сейсмограмм, группированием сейсмоисточников и сейсмоприемников, накоплением реализаций

наблюденных сигналов и многократным перекрытием глубинных точек. Несмотря на такую глубокоэшелонированную поддержку кондиционности исследований, сейсморазведочные работы в обязательном порядке контролируются этапами оценки качества и приемки материалов полевых наблюдений, результаты которой не всегда бывают положительными. Повторная отработка непринятых физнаблюдений приводит к экономическим потерям и нарушению планомерности и ритма полевых работ. Однако и в случае приемлемого осуществления исследований зарегулированность итоговых сейсмозаписей в область низких частот сопутствующими избыточности наблюдений разбросом параметров наблюдаемых сигналов и их осреднением препятствует достижению актуальной для настоящего времени детальности сейсмического изучения среды. Об ущербности безусловного использования избыточных технологий, последствия применения которых могут быть неоправданно отнесены на счет поглощения и рассеивания высоких частот средой, свидетельствуют результаты отказа от группирования и работа с одиночными источниками и приемниками сейсмических сигналов [6].

Интенсификация качества исследований осуществляется адаптивной сейсморазведкой [2, 4]. Предельно эффективной в этом отношении является адаптивная сейсморазведка, ключевым понятием и критерием осуществления которой является спектр отношения сигнал-помеха, определяемый как неотрицательная функция частоты, значением которой для заданного значения частоты является отношение модуля спектра сигнала к модулю спектра помехи на данной частоте [4]. Энергетический спектр отношения сигнал-помеха определяется как отношение квадратов модулей спектров сигнала и помехи. Так как применение спектров отношения сигнал-помеха имеет в адаптивной технологии сейсморазведки сравнительный характер, использование тех или иных из них по определению является вопросом удобства.

Целью данной работы является рассмотрение вопроса оптимального комбинирования интенсификации производительности и качества исследований в адаптивной технологии сейсморазведки.

По своей сущности энергетический спектр отношения сигнал-помеха

$$\rho(\omega) = \frac{B_f(\omega)}{B_n(\omega)}$$

является спектром выходного сигнала оптимального фильтра обнаружения $D(\omega) = \frac{F^*(\omega)}{B_n(\omega)}$ известного сигнала

$f(t)$ со спектром $F(\omega)$ на фоне помех $n(t)$, $\rho(\omega) = D(\omega)F(\omega) =$

$$= \frac{F^*(\omega)F(\omega)}{B_n(\omega)} = \frac{|F(\omega)|^2}{B_n(\omega)} \cdot \frac{B_f(\omega)}{B_n(\omega)}, \text{ где } F^*(\omega) -$$

комплексно сопряженный спектр сигнала $f(t)$ $B_f(\omega)$ – спектр автокорреляционной функции сигнала, $f(t)$ $B_n(\omega)$ – спектр автокорреляционной функции помехи $n(t)$. Независимо от интенсивности наблюдаемого сигнала оптимальный фильтр обнаружения обеспечивает максимум ρ_m отношения сигнал-помеха – отношение квадрата заданного, обычно амплитудного, значения сигнала к дисперсии помехи:

$$\begin{aligned} \rho_m &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|F(\omega)|^2}{B_n(\omega)} d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_f(\omega)}{B_n(\omega)} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\omega) d\omega \quad [1]. \end{aligned}$$

Являющееся числом отношение сигнал-помеха не может служить указателем того, какая область частот и в какой мере усложняет достижение требуемого качества наблюдений. Требованиям адаптивной технологии удовлетворяет подинтегральная функция приведенного определенного интеграла – спектр отношения сигнал-помеха $\rho(\omega)$, который как функция частоты обеспечивает возможность спектрально дифференцированного противодействия произвольным по своему спектральному составу помехам возбуждением соответственно спектрально дифференцированных зондирующих сигналов и делает возможным

оптимальное корректирование наблюдений в изменчивых сейсмогеологических условиях работ в зависимости от особенностей строения и состава геологической среды и характера и интенсивности помех.

Спектром отношения сигнал-помеха однозначно определяется оптимальный винеровский фильтр воспроизведения

$$R(\omega) = \frac{B_s(\omega)}{B_s(\omega) + B_n(\omega)} = \frac{\rho(\omega)}{\rho(\omega) + 1} \quad \text{сигнала}$$

$s(t)$ по его реализациям $u(t)=s(t)+n(t)$, который в свою очередь является спектральным множителем специализированных оптимальных винеровских фильтров, обобщенно определяемых как корректирующий фильтр $G(\omega)=R(\omega)S^{-1}(\omega)V(\omega)$, где $S^{-1}(\omega)$ – идеальный фильтр сжатия сигнала $s(t)$, $V(\omega)$ – спектр сигнала $v(t)$ специализации, к которому наблюденные реализации сигнала $s(t)$ приводятся фильтром $G(\omega)$ с минимальной среднеквадратической погрешностью [1, 5]. Для фильтра воспроизведения, в частности, $v(t)=\delta(t)$, $V(\omega)=S(\omega)$; для фильтра сжатия $v(t)=s(t)$, $V(\omega)=1$, где $\delta(t)$ – дельта-функция.

Оптимальная фильтрация наблюденных сигналов обеспечивает максимальное использование содержащейся в них информации, реализуя восхождение к заданным показателям качества исследований по гребню максимальных значений спектра отношения сигнал-помеха на каждом значении частоты в диапазоне частот исследований. Определенное по результатам оптимальной фильтрации недостижение заданных показателей качества исследований свидетельствует о необходимости продолжения отработки физнаблюдения и инъекции в среду дополнительной энергии путем возбуждения зондирующих сигналов определенного спектрального состава. Полнота адаптивной технологии сейсморазведки определяется полнотой использования в ней оптимальной фильтрации наблюденных сигналов. Коренным образом решение этого вопроса обеспечивается использованием в адаптивной технологии основы оптимальной фильтрации – спектров отношения сигнал-помеха.

Требования геологических заданий сейсмических исследований выражаются заданными спектрами отношения сигнал-помеха целевых сигналов, которыми регламентируется временная и амплитудная разрешающая способность наблюдений и, в конечном счете, структурная и параметрическая детальность сейсмического изучения геологической среды. Заданные спектры отношения сигнал-помеха формируют исходя из потребностей обработки и интерпретации материалов полевых наблюдений, и на момент отработки физнаблюдений они являются известными.

В принципе, форма заданных спектров в пределах ограничений, устанавливаемых определением спектров отношения сигнал-помеха, может быть произвольной. Задание равномерных спектров свидетельствует об одинаковой заинтересованности исследователя в получении информации о среде на всех частотах в диапазоне частот исследований. Однако в области высоких частот для глубинных целевых сигналов требование равномерности заданных спектров может быть экономически затратным и целесообразность его должна быть обоснованной. Такие затраты являются оправданными для параметрических физнаблюдений (сейсмических аналогов параметрических скважин по информативности).

В процессе отработки физнаблюдений сопоставляют заданные и фактически полученные спектры отношения сигнал-помеха и определяют необходимость продолжения отработки физнаблюдения или достаточность выполненных наблюдений для ее завершения. Сопоставление спектров в процессе отработки физнаблюдения может быть многообразным, а его отработка – многоэтапной. На начальном этапе зондирование среды осуществляют широкополосными сигналами в диапазоне частот исследований. Параметры зондирующих сигналов для продолжения отработки физнаблюдения определяют на основании сопоставления заданных и фактически полученных спектров отношения сигнал-помеха для всех целевых сигналов. Критерием завершения отработки физнаблюдения

ния является достижение или превышение заданных спектров, фактически полученными для всех целевых сигналов [4].

Изложенная часть статьи касается работ с одиночным источником зондирующих сигналов, при котором пространственная адаптация наблюдений не требует технологического обеспечения. Пространственный аспект адаптивных наблюдений имеет место в случае одновременной работы сейсмоисточников, групп сейсмоисточников или сейсмокомплексов, размещенных на площади исследований на удалениях их возможных сейсмических взаимовлияний. Соблюдение требований адаптивной технологии без ущерба для производительности наблюдений при этом обуславливает необходимость совмещения во времени сеансов возбуждения зондирующих сигналов различными сейсмоисточниками с дальнейшим выделением парциальных сейсмограмм отдельных сейсмоисточников из совокупных интерференционных сейсмозаписей в процессе их обработки.

Технологически приемлемым и предпочтительным способом совмещения во времени независимой работы сейсмоисточников является кодирование возбуждаемых ими зондирующих сигналов по схеме знаков элементов матриц Адамара [3]. Порядок используемой матрицы Адамара должен быть большим или равным количеству одновременно работающих сейсмоисточников, а количество сеансов возбуждения ими зондирующих сигналов и регистрации первичных совокупных интерференционных сейсмозаписей должно быть кратным порядку матрицы [4]. Преимуществом использования матриц Адамара по сравнению с прочими возможностями обеспечения одновременной независимой работы сейсмоисточников является достаточность манипулирования полярностью зондирующих сигналов. Амплитуда и форма последних могут быть произвольными и различными для одновременно активизируемых сейсмоисточников, но неизменными для сеансов определенного технологического этапа обработки физнаблюдения.

Первоочередной операцией обработки первичных совокупных интерференционных сейсмозаписей одновременно работающих сейсмоисточников является выделение парциальных сейсмограмм отдельных сейсмоисточников. Математически такая операция является решением систем линейных алгебраических уравнений, матрицами коэффициентов которых являются обратимые матрицы Адамара. Решением систем уравнений обработка совокупных интерференционных сейсмозаписей распараллеливается в обработку парциальных сейсмограмм отдельных сейсмоисточников, используемых по изложенной выше схеме обработки сейсмограмм физнаблюдений, выполненных одиночным сейсмоисточником.

Наиболее предпочтительными для осуществления адаптивной технологии являются вибрационные сейсмоисточники. В связи с этим далее используется терминология вибрационной сейсморазведки. Минимальная по количеству регистрируемых виброграмм адаптивная отработка этапа физнаблюдения одиночным сейсмоисточником представляется матрицей

Адамара второго порядка $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$, элемен-

ты столбцов которой кодируют полярности возбуждаемых конкретным сейсмоисточником зондирующих сигналов в различных сеансах, а элементы строк – полярности возбуждаемых различными сейсмоисточниками зондирующих сигналов в конкретном сеансе. В случае матрицы Адамара второго порядка второй фиктивный сейсмоисточник считается “немым” (возбуждающим зондирующие сигналы нулевой амплитуды и интенсивности). Полусумма зарегистрированных виброграмм, возбужденных реальным сейсмоисточником, содержит осложненную помехами информацию о среде, а их полуразность является сейсмограммой реализации помехи, статистически эквивалентной реализации помехи, осложняющей информацию о среде. Таким образом, решение системы линейных уравне-

ний, матрицей коэффициентов которой в рассматриваемом случае является матрица Адамара второго порядка, обеспечивает получение исходных данных для вычисления спектров отношения сигнал-помеха целевых сигналов. Матрицы Адамара порядка 2^{k+1} формируются из матриц Адамара порядка 2^k по схеме $\begin{pmatrix} A & A \\ A & -A \end{pmatrix}$. Воз-

можность получения исходных данных для вычисления спектров отношения сигнал-помеха наследуется всеми матрицами Адамара указанного степенного ряда порядков, применяемыми для кодирования зондирующих сигналов, возбуждаемых многими одновременно, но независимо действующими сейсмоисточниками.

Для объективной геологической интерпретации материалов наблюдений они должны быть избавлены от технологических последствий их получения, подобно тому как первичные сейсмограммы вибрационной сейсморазведки регистрируются в форме виброграмм, а обрабатываются и интерпретируются в форме коррелограмм. Однако коррелограммы не являются окончательной формой сейсмического отображения геологической среды. Требованиям адаптивной технологии удовлетворяют импульсные сейсмограммы, получаемые в результате деконволюции коррелограмм. Эффект деконволюции заключается в восстановлении импульсной характеристики среды, искаженной фильтрационным действием возбуждения и распространения в ней сейсмических колебаний на пути от сейсмоисточников до сейсмоприемников.

Обеспечиваемое спектрами отношения сигнал-помеха наличие критерия осуществления оптимально корректируемой обработки физнаблюдений и ее результативного завершения является предпосылкой и основой создания соответствующим образом программно-оснащенных автоматизированных сейсмокомплексов адаптивного мониторинга условий осуществления и супервайзинга качества выполнения наблюдений. Автоматизированные адаптивные сейсмокомплексы

являются инструментом осуществления адаптивной технологии и воплощением способствующих ее осуществлению достижений современной сейсморазведки. В традиционной терминологии сейсморазведки технологическое квантование исследований путем обособления и конкретизации обработки физнаблюдений является непрерывно делящимися опытно-методическими работами, выполняемыми адаптивными сейсмокомплексами в пространственно-временных пределах каждого физнаблюдения и, следовательно, во всем исследуемом пространстве.

Независимая обработка пунктов возбуждения сейсмических волн делает возможными одновременную работу многих сейсмокомплексов на площади исследований, совмещение во времени возбуждения продольных и поперечных волн и поперечных волн различной поляризации соответственно специализированными сейсмоисточниками, комплексирование совмещенных во времени исследований на дневной поверхности и в скважинах, на акваториях, в переходных зонах и на суше, совместное одновременное выполнение исследований глубинной и верхней частей геологической среды.

Требуемое многоволновой и многоцелевой адаптивной сейсморазведкой обособление приема сейсмических волн одиночными или ограниченно группируемыми сейсмоприемниками обеспечивается технически созданием современных многоканальных и сверхмногоканальных систем многокомпонентной регистрации сейсмических колебаний [6].

Вычислительная поддержка сложного и напряженного функционирования адаптивных сейсмокомплексов в процессе обработки физнаблюдений необходимо должна быть оперативной и выполняться в реальном времени. Актуальным в связи с этим является сокращение объемов вычислительных операций, доминирующей в числе которых является деконволюция коррелограмм. Резервы кроются в использовании мажорантных зондирующих сигналов.

Наиболее критические обстоятельства обработки физнаблюдений имеют место

для наименее интенсивных целевых сигналов, осложненных наиболее интенсивными помехами. Сформированные для критических сейсмозаписей энергетически максимизированные мажорантные зондирующие сигналы являются заведомо приемлемыми для прочих менее критических случаев соотношения сигналов и помех. Обычно проблемные целевые сигналы на площади исследований известны и выявление среди активизированных для отработки физнаблюдения сейсморегистрирующих каналов критических может быть произведено на основании анализа помех достаточно простыми программными средствами. Сокращение объемов вычислений за счет деконволюции только коррелограмм критических каналов обеспечивает необходимую оперативность вычислительной поддержки функционирования адаптивных сейсмокомплексов.

Применение автоматизированных адаптивных сейсмокомплексов и осуществление с их помощью текущего анализа сейсмогеологических условий работ делает возможным оптимальное комбинирование интенсификации производительности и качества исследований. Экономически целесообразное сочетание высокопроизводительной и высокоточной отработки физнаблюдений при соблюдении регламентированного геологическим заданием требования качества исследований является отражением объективных условий отработки физнаблюдений. Эффективность комплексной интенсификации исследований обеспечивается выполнением её в подходящем месте и в подходящее время, а именно в процессе полевых работ

и в пространственно-временных пределах конкретных физнаблюдений.

Таким образом, количественная и качественная интенсификация сейсморазведки сводится к следованию принципам адаптивной технологии сейсмических наблюдений. Максимизированная по показателям производительности с соблюдением экономически целесообразных требований обеспечения заданного качества исследований универсальная интенсивная сейсморазведка является иным названием адаптивной сейсморазведки. Предельно эффективная адаптивная сейсморазведка является единственной в своем роде и не может иметь технологически различных равноценных по результативности аналогов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. М.: Недра, 1980. 551 с.
2. Жуков А. П., Колесов С. В., Шехтман Г. А., Шнейерсон М. Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Тверь: ООО "Издательство ГЕРС", 2011. 412 с.
3. Математическая энциклопедия. Москва: Сов. энцикл., 1977. Т. 1. 85 с.
4. Роман В. І., Шпортюк Г. А., Гринь Д. М., Мукоед Н. І. Адаптивні сейсмічні дослідження: моделі реєстрації сейсмічних полів//Геофізический журнал. 2011. 33, № 6. С. 152–156.
5. Френкс Л. Теория сигналов. Нью-Джерси, 1969 г. Пер. с англ./Под ред. Д. Е. Вакмана. М.: изд-во "Сов. радио", 1974. С. 228–230.
6. Череповский А. В. Сейсморазведка с одиночными приемниками и источниками: обзор современных технологий и проектирование съемок. Тверь: ООО "Издательство ГЕРС", 2012. 134 с.

Рукопис отримано 23.10.2013.

Сучасна нафтогазова сейсморозвідка є інтенсивною за темпами й продуктивністю спостережень. Інтенсивною в сенсі методичного й технологічного забезпечення якості досліджень є адаптивна сейсморозвідка. Ключовим поняттям і критерієм здійснення адаптивної технології та основою функціонування автоматизованих адаптивних сейсморозвідувальних комплексів є спектри відношення сигнал-завада цільових сигналів. У поняттях сучасної сейсморозвідки адаптивні дослідження є неперервними дослідно-методичними роботами, виконуваними в просторово-часових межах кожного фізспостереження і, відповідно, на всій площі досліджень. Здійснюваний автоматизованими

адаптивними сейсмокомплексами моніторинг умов спостережень і супервайзинг якості їх виконання робить можливим економічно доцільне комбінування високопродуктивного й високоточного відпрацювання з дотриманням регламентованих геологічним завданням вимог якості досліджень.

Ключові слова: інтенсивна сейморозвідка, адаптивна сейморозвідка, спектри відношення сигнал-завада цільових сигналів, адаптивна технологія, автоматизований адаптивний сейморозвідувальний комплекс.

Modern oil-gas seismic exploration is intensive by rate of work and productivity of observations. Adaptive seismic exploration is intensive in the sense of methodical and technological support of the quality of studies.

A key notion and criterion of realization of adaptive technology and the basis of functioning of adaptive seismic exploration complexes are spectra of ratio signal-noise of target signals. In the notions of modern seismic exploration adaptive studies are uninterruptedly continuing experimentally methodic works, performed within spatial-temporal limits of each physical observation and, as a result, within the area of studies as a whole. Executed by automated adaptive seismic complexes monitoring of observation conditions and supervising of quality of their performance makes possible economically rational combining of physical observations with their highly productive and highly accurate processing together with maintenance of scheduled by geological task demands to the quality of studies.

Keywords: intensive seismic exploration, adaptive seismic exploration, spectra of ratio signal-noise of the target signals, adaptive technology, automated adaptive seismic exploration complex.