

УДК 549

А.А. Бочарова¹, Н.В. Шалаева²

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИЗУЧЕНИЯ ПОДОШВЫ ТОЛЩИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА МОРСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОГО ВЫЧИТАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

Рассмотрен алгоритм разделения волновых полей с целью изучения подошвы гидратосодержащей толщи по сейсмическим данным. Подобное разделение осуществляется при помощи адаптивного вычитания одного волнового поля из другого и позволяет в итоге выделить сейсмическое отражение, соответствующее подошве гидратоносного слоя, на фоне интерференции с отражениями, которые отвечают разным литологическим границам. Полученные результаты можно использовать для уточнения спектральных характеристик подошвы гидратоносного слоя.

Ключевые слова: газовые гидраты, BSR, адаптивное вычитание волновых полей.

New method of Bottom Simulating Reflector investigations using wave field separation is presented. To separate initial wave field with strong interference into bottom simulating reflector and residual wavefield we use adaptive seismic suppression. This investigation can be used for better understanding of sediment-hosted gas hydrates spectral characteristics.

Key words: gas hydrates, BSR, adaptive seismic suppression method.

Введение. Газовые гидраты — кристаллические, макроскопически льдоподобные вещества, образующиеся в диапазоне определенных значений температуры и давления из воды и газа при достаточно высоких концентрациях. Газогидраты интересны как источник нетрадиционного углеводородного сырья, индикатор более глубоких залежей углеводородов, возможный источник поступления парникового газа в атмосферу, а также в связи с опасностью при бурении и строительстве инженерных сооружений. Особый интерес представляют вопросы их разложения и так называемой самоконсервации. Значительная часть природных гидратов локализована в многолетней мерзлоте или в придонных областях морей и океанов. Для идентификации гидратопроявлений используются различные физические, геохимические и геологические признаки. Основной геофизический признак для акваторий — отражающий сейсмический горизонт BSR (Bottom Simulating Reflector), т.е. отражение, похожее на донное, — нелитологическая граница часто обратной полярности по отношению к дну, соответствующая подошве гидратоносной толщи и одновременно кровле толщи того же литологического состава, содержащей свободный газ вместо гидрата [Макогон, 2009].

В статье рассмотрен способ разложения волнового поля, полученного на акваториях и содержащего BSR, на две составляющие: волновое поле без BSR и отдельно граница типа BSR, выделенная из разреза методом адаптивного вычитания модели BSR,

полученной по донному отражению из исходных данных. Подобное разложение поля на различные составляющие позволит эффективно изучать спектральный состав и конфигурацию BSR и литологических границ независимо, причем даже в тех местах, где раньше это было невозможно из-за проявления интерференции.

Теоретические основы алгоритма адаптивного вычитания волновых полей. Для разделения волновых полей используем алгоритм, схожий с алгоритмом подавления кратных волн при помощи адаптивного вычитания полученной модели кратных волн из исходного волнового поля, описанный в статье [Денисов и др., 2006]. Прогнозирование BSR будет осуществляться на основе донного отражения в условиях априорной неопределенности. В этом случае форма импульса в модели BSR соответствует автосвертке исходного сигнала, при этом форма сигнала искажается. Искажения формы волны, носящие сверточный характер, приводят к тому, что для вычитания приходится использовать многоканальные фильтры, адаптирующие поле, которое содержит BSR, к исходной записи.

Стандартный метод адаптации — подбор такого стационарного формирующего винеровского фильтра $g(t)$, что

$$\hat{g}(t) = \arg \min_{\tilde{g}(t)} \int_t (p(a, b, t) - \tilde{g}(t) * l(a, b, t))^2 dt, \quad (1)$$

где $p(a, b, t)$ — исходная трасса, a и b определяют пространственные координаты трассы, $l(a, b, t)$ — рас-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, аспирантка, e-mail: alina@radexpro.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, доцент, канд. геол.-минер. н., e-mail: nvshalaeva@seismic.geol.msu.ru

считанная модель кратных волн. Получим алгоритм, позволяющий учитывать возможность несоответствия (в том числе нестационарного по t) трасс $p(a, b, t)$ и $l(a, b, t)$, но в то же время не имеющий столько степеней свободы, чтобы скорректировать произвольные различия. Традиционный метод учета нестационарности в задаче адаптации — «локально-стационарная многооконная фильтрация», т.е. стационарная в пределах окна, при которой трасса разбивается на интервалы:

$$\hat{g}_i(t) = \arg \min_{\tilde{g}_i(t)} \int_{\tilde{T}_i}^{\hat{T}_i} (p(a, b, t) - \tilde{g}_i(t) * l(a, b, t))^2 dt, \quad (2)$$

где i — номер окна, \tilde{T}_i, \hat{T}_i — его нижняя и верхняя границы соответственно. Недостатки этого метода заложены в самой постановке задачи коррекции нестационарности при помощи разбивки трассы на интервалы, в пределах которых такие эффекты считаются уже несущественными. Приходится производить настройку фильтров в небольших окнах, что заметно ухудшает статистические свойства оценок и приводит к ослаблению энергии отражающих горизонтов, интерферирующих с BSR, при вычитании. Кроме того, как следует из (1), такая параметризация характера нестационарности описывается скачкообразными изменениями фильтров на границах окон. Вводя матричные обозначения \tilde{g}, \hat{g} для набора фильтров $\hat{g}_i(t)$ и $\tilde{g}_i(t)$, уравнение (1) можно представить в виде

$$\hat{g}(t) = \arg \min_{\tilde{g}} \sum_i \int_0^T (p(a, b, t) - (w_i(t)l(a, b, t)) * \tilde{g}_i(t))^2 dt, \quad (3)$$

$$w_i(t) = \begin{cases} 1, & t \in (\tilde{T}_i, \hat{T}_i) \\ 0, & t \notin (\tilde{T}_i, \hat{T}_i) \end{cases}$$

где T — длина трассы, $w_i(t)$ — ступенчатая функция. Следует уменьшить число степеней свободы формирующего фильтра, в то же время сохраняя его нестационарность, т.е. позволить ему корректировать возможные динамические вариации, но не в произвольном режиме. Предлагается использовать гладкие функции для взвешивания модели BSR. В данном случае это выглядит как замена ступенчатых функций $w_i(t)$, например на полиномы $w_i(t) = t^i$. В этом случае оптимизационная задача соответствует оцениванию по всей трассе нестационарного, но плавно меняющегося формирующего фильтра.

Технически эту процедуру удобно реализовывать следующим образом. Сначала трасса $l(a, b, t)$ взвешивается набором гладких функций $w_i(t)$, в результате чего получается набор моделей BSR $l_i(a, b, t) = l(a, b, t)w_i(t)$. Адаптация осуществляется оцениванием стационарного формирующего фильтра по каждой трассе $l_i(a, b, t)$. Используем аналогичное обозначение для второго набора BSR $l'_i(a, b, t) = l(a, b, t)w_i(t)$. Для более уверенной оценки, особенно на фоне шумов, полезно привлекать и соседние трассы, например $l(a, b + \Delta x, t)$,

$l(a, b - \Delta x, t)$ и т.д., где Δx — шаг по латерали. Тогда задача адаптации модели BSR к исходным данным формулируется следующим образом: требуется найти $\tilde{g}_k(i, t), \tilde{g}'_k(i, t)$, минимизирующие функционал

$$\hat{g}, \hat{g}' = \arg \min_{\tilde{g}, \tilde{g}'} \int_0^T (p(a, b, t) - \sum_{k=-M}^M \sum_{i=0}^N (\tilde{g}_k(i, t) * l_i(a, b + k\Delta x, t)) + (\tilde{g}'_k(i, t) * l'_i(a, b + k\Delta x, t)))^2 dt, \quad (4)$$

что приводит к алгоритму Левинсона для многоканальных фильтров. Блочно-теплицева матрица, получаемая при минимизации, может становиться плохо обусловленной. Чтобы избежать этого, для каждой трассы в базе $(b - M\Delta x, b + M\Delta x)$ найдем свой оптимальный многоканальный по переменной i фильтр и получим

$$\tilde{l}(a, b + k\Delta x, t) = \sum_{i=0}^N (\hat{g}_k(i, t) * l_i(a, b + k\Delta x, t) + \hat{g}'_k(i, t) * l'_i(a, b + k\Delta x, t)) \quad (5)$$

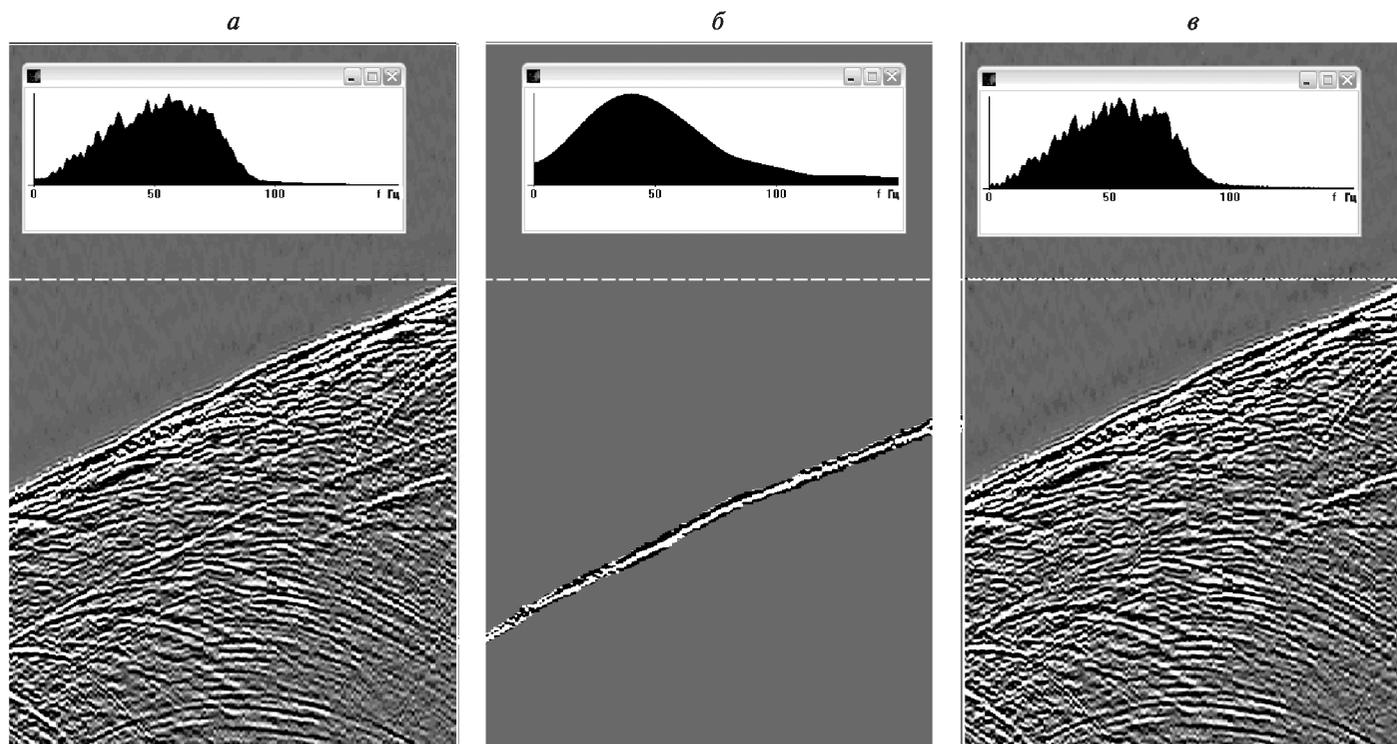
Затем найдем такие коэффициенты \hat{c}_k , что

$$\hat{c}_k = \arg \min_{\tilde{c}_k} J_{a,b}(\tilde{c}), \quad (6)$$

$$J_{a,b}(\tilde{c}) = \int_0^T (p(a, b, t) - \sum_{k=-M}^M \tilde{c}_k \tilde{l}(a, b + k\Delta x, t))^2 dt. \quad (7)$$

Процедура повторяется итеративно с изменением $p(a, b, t)$ до достижения минимума функционала $J_{a,b}(\tilde{c})$. Для достижения дальнейшего повышения устойчивости алгоритма в смысле глубины подавления регулярного шума при сохранении динамики сигнала можно использовать пространственное сглаживание, что приводит к получению регуляризированных решений.

Экспериментальная часть. Описанная методика выделения BSR из волнового поля опробована на фрагментах морских сейсмических немигрированных данных ближних каналов. К данным был применен фильтр Ормсби с полосой пропускания от 5–10 до 70–100 Гц. Разделение волновых полей проведено при помощи модуля Wavefield Substraction в программе RadExPro. Для построения модели отражения BSR выделено отражение, соответствующее морскому дну, вся остальная запись обнулена. После этого полученное трехфазное отражение статическими поправками сдвинуто на время, соответствующее границе типа BSR в разрезе. Для построения модели использовано окно фильтра, равное 50 мс, модельная трасса конструировалась по 5 соседним трассам, после этого



Исходное волновое поле (а), модель BSR (б) и результат вычитания модели из исходного поля (в) и соответствующие им амплитудные спектры

производилось сглаживание результирующей модели по 100 трассам.

Результаты и их обсуждение. На рисунке приведены исходное волновое поле, модель BSR и результат вычитания модели из исходного поля и соответствующие им амплитудные спектры. Чтобы убедиться в корректности разделения волновых полей таким способом, измерены средние значения амплитуд и спектральные характеристики донного отражения, литологических границ, пересекающих BSR, и самого BSR. Порядок амплитуд, а также спектральный состав записи оказались идентичны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Денисов М.С., Полубояринов М.А., Фиников Д.Б. Устойчивые методы адаптивного вычитания кратных волн в сейсморазведке. Тезисы к 9-й Междунар. геофизической конференции г. Санкт-Петербург 2006. СПб.: ЕАГЕ, 2006.

Таким образом, разделение волновых полей методом адаптивной фильтрации полей с целью последующего анализа спектрального состава корректно. В случаях, когда модель BSR, полученная для дна, не позволяет успешно разделить поля, но при этом существует поддонная граница, более похожая по форме на BSR, которая позволяет эффективно смоделировать и вычесть BSR, можно сделать предположение о действии эффекта самоконсервации газовых гидратов (или их медленном разложении), так как вероятно, что в этих зонах гидраты продолжают существовать в неравновесных термобарических условиях.

Макогон Ю.Ф. Природные газогидраты: результаты и перспективы: Междунар. конференции «Перспективы освоения ресурсов газогидратных месторождений» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 17–18 ноября 2009. М., 2009.

Поступила в редакцию
03.03.2011