

Накопленный опыт обработки и интерпретации сейсмике высокого разрешения. Технология «nSeis»

■ Хромова И.Ю.¹, Архипов А.А.²

¹ ИП Хромова И.Ю. Россия, г. Москва.

² ООО «Геошельф-Сервис». Россия, г. Геленджик.

Развёрнутое описание технологии расширения спектра «nSeis»

Существуют различные способы оценки разрешающей способности материалов сейсморазведки, но несмотря на их отличия, нет сомнений в том, что вертикальная и латеральная разрешающая способности напрямую зависят от информативной высокочастотной границы спектра разреза.

Спектры сейсмической записи реальных и модельных сред, при условии наличия в них контрастных границ, обогащены гармоническими пакетами (рисунок 1). Если в зарегистрированный диапазон частот попадает от двух и более пакетов, то возможно путём нелинейного анализа продолжить спектр вправо (в область высоких частот, ВЧ).

Алгоритм нелинейного анализа продолжения спектра в общем виде выражается как:

$$\|K_s^{-1}(t) * T_{2,n}(H_{pri}(t) * K_s(t) * a(t)) - H_{sec}(t) * K_s^{-1}(t) * a(t)\|_M \rightarrow \min \quad (1)$$

где где $K_s(t)$ – ФНЧ, H_{pri} – фильтр первой

частотной группы, H_{sec} – фильтр второй частотной группы, $T_{2,n}$ – преобразование Тейлора, $a(t)$ – сейсмотрасса, M – метрика.

В частном случае характеристика H_{pri} и H_{sec} – неизвестны, положим их дельта импульсом, тогда:

$$\|K_s^{-1}(t) * T_{2,n}(K_s(t) * a(t)) - * K_s^{-1}(t) * a(t)\|_M \rightarrow \min \quad (2)$$

Частота среза фильтра $K_s(t)$ – вариативна (и неизвестна), ограничена шириной спектра зарегистрированного сигнала и окном временной выборки.

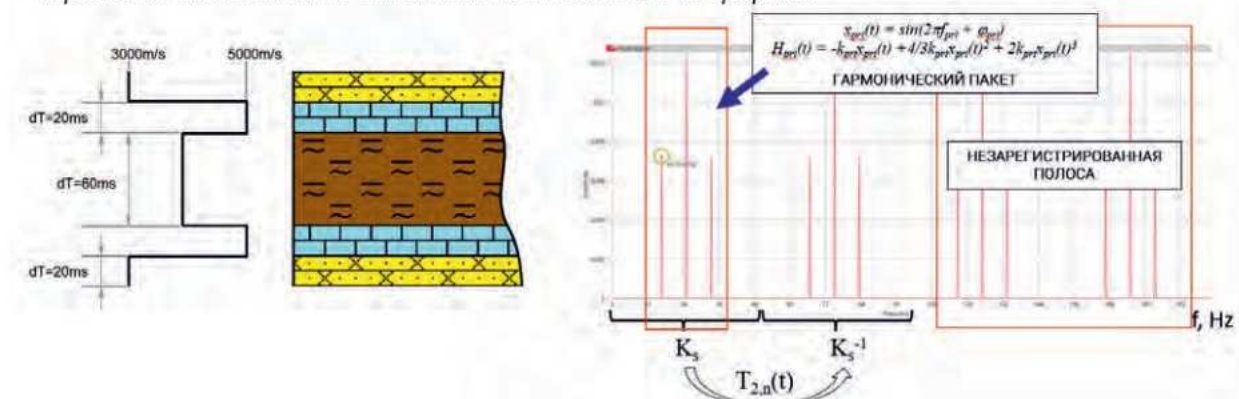
Таким образом для определения коэффициентов $T_{2,n}$ решается задача:

$$\sum_i (\|K_{s_i}^{-1}(t) * T_{2,n}(K_{s_i}(t) * a(t)) - * K_{s_i}^{-1}(t) * a(t)\|_M) \rightarrow \min \quad (3)$$

С другой стороны, вариативность частоты среза $K_{s_i}(t)$ позволяет повысить устойчивость определения функции $T_{2,n}(t)$ (коэффициентов), единой для всех частотных разбиений зарегистрированной полосы (рисунок 2).

В случае рассматриваемой модели, применение $T_{2,n}(t)$ ко всей исходной

▼ Рис. 1. Пластовая модель и спектр соответствующей ей синтетической сейсмотрассы с частотными пакетами и описанием их формы.



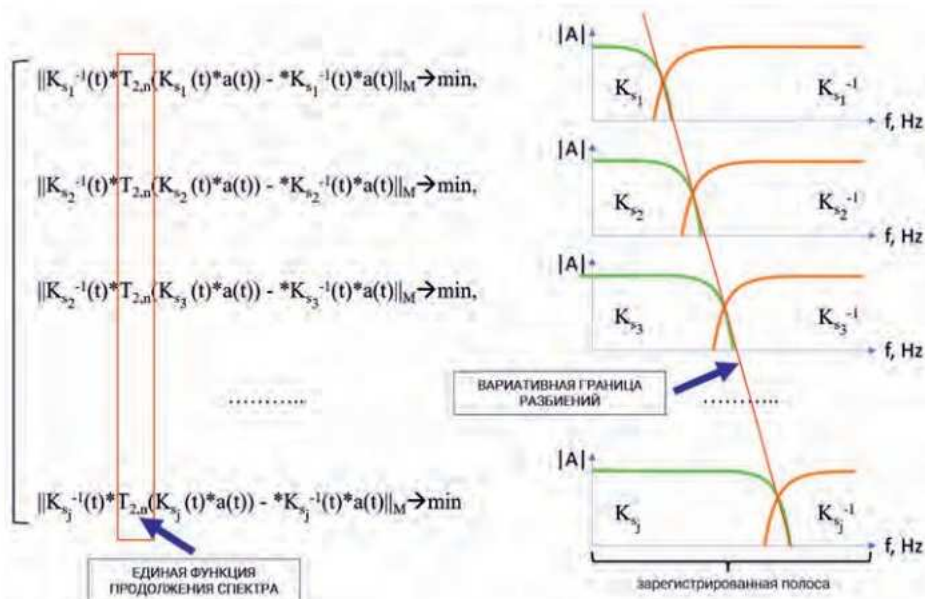


Рис. 2. Частотные разбиения и единственность функции $T_{2,n}(t)$.

полосе зарегистрированного сигнала позволяет продолжить частотный спектр вправо (в незарегистрированную в исходной записи полосу) (рисунок 3).

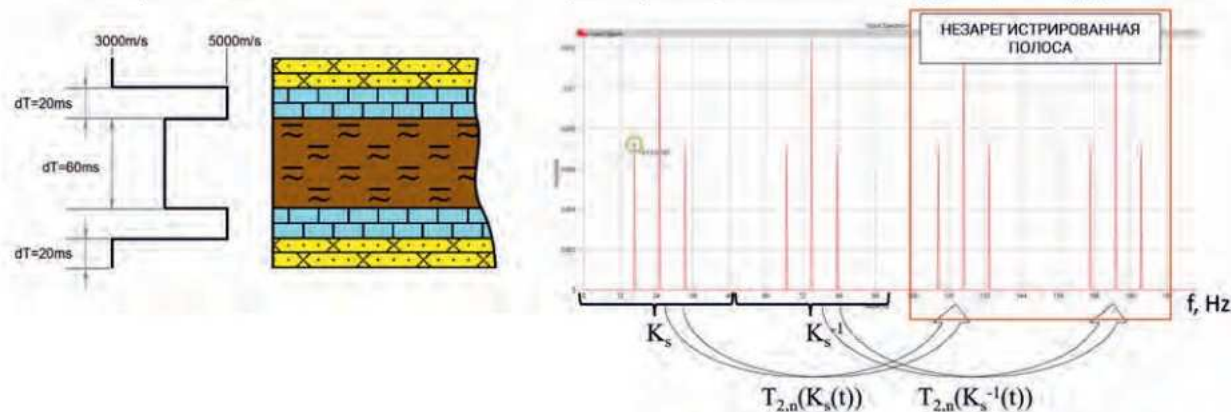
Интерпретация результатов «nSeis»

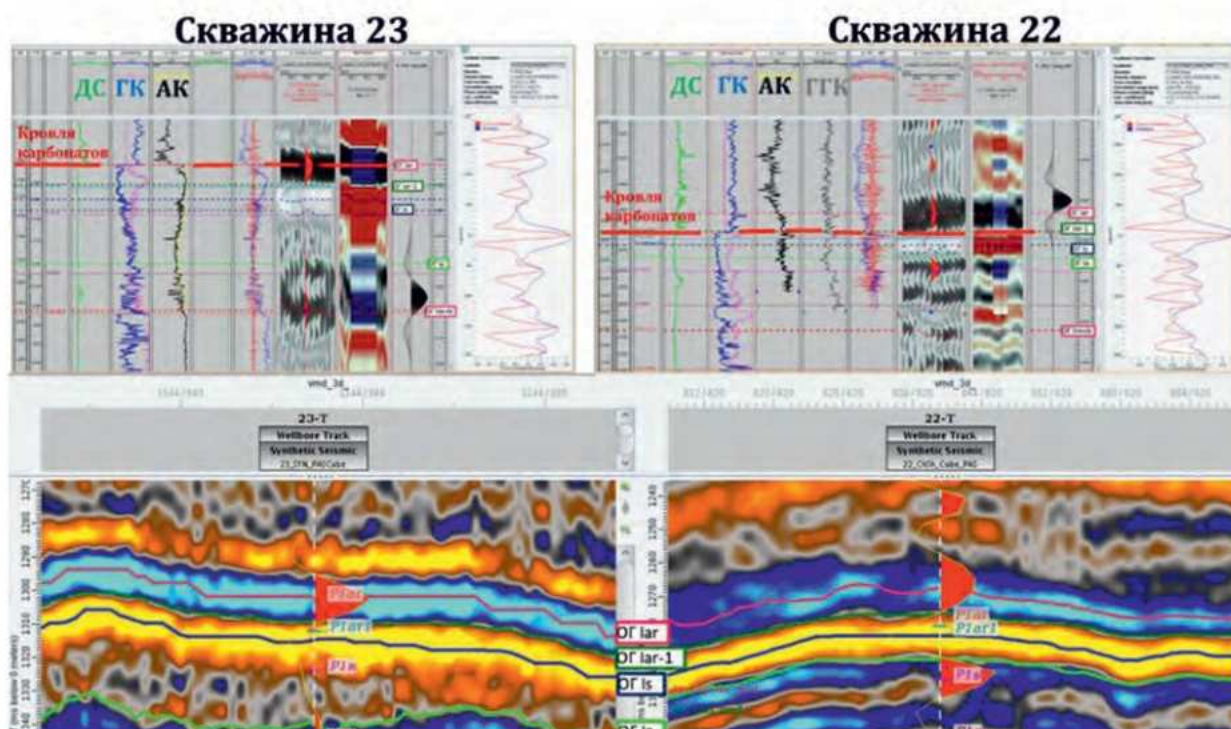
Особенность интерпретации высоко-разрешенных сейсмических данных заключается в кратном повышении сложности и трудоемкости такой работы: возрастает не только количество фаз внутри целевого интервала, но и видимое количество неоднородностей типа малоамплитудных тектонических нарушений или малоразмерных геологических тел. Волновая картина с одной стороны обогащается геологической информацией, а с другой стороны атомизируется

до пестроты, затрудняющей визуальное восприятие. Имея насущное желание увидеть на разрезах отражения от более тонких пластов-коллекторов, интерпретаторы не задумываются о том, что вместе с ростом разрешенности возрастает и количество фаз от пластов-неколлекторов. А значит и возрастает роль детальной привязки в целевом интервале.

В ходе привязки к стандартным данным является привычным неполное соответствие сейсмических отражений скважинным реперам. Устоявшееся выражение «Отражающий горизонт вблизи кровли отложений...» указывает на смиренное осознание объективной неточности привязки в условиях интер-

Рис. 3. Продолжение частотного спектра вправо (в область ВЧ) функцией $T_{2,n}(t)$.



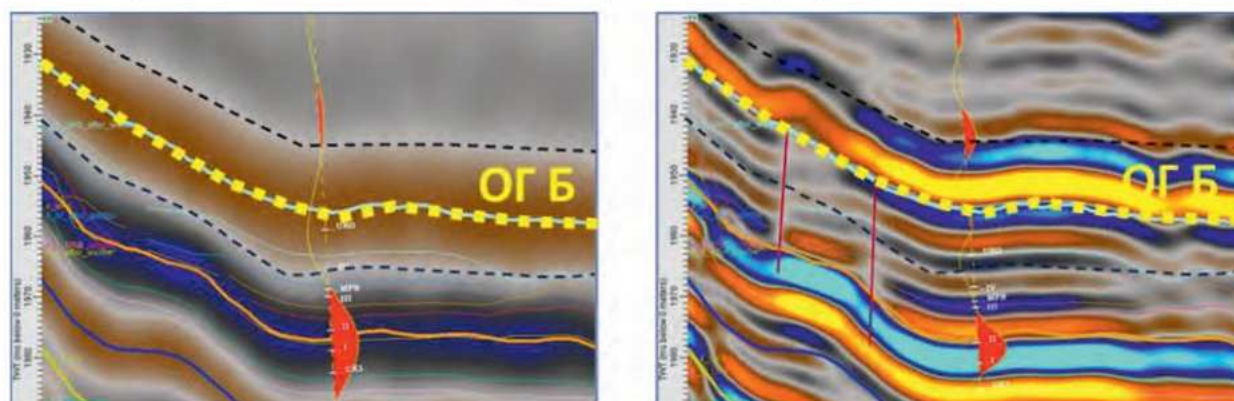


▲ Рис. 4. Смещение ГИС-репера P1ar от положения ОГ P1ar за счет интерференции в высокоскоростном низкочастотном разрезе.

ференции и низкой разрешенности. Считается нормальным, что экстремум опорного отражающего горизонта может отстоять от ГИС-репера на несколько миллисекунд. Это эффект учитывается в формулах оценки точности структурных построений, как интервал погрешности корреляции отражающего горизонта и зависит от четверти периода отражения или половина ширины коррелируемой фазы [1]. За счет интерференции в низкочастотном и высокоскоростном разрезе

отклонение пикировки горизонта от реальной границы может достигать 8 мс или 15 м. Пример такого случая показан на рисунке 4. Кровля пермских карбонатов в скважине 23 (и в остальных скважинах этого месторождения в Тимано-Печорском НГБ) по результатам привязки соответствует экстремуму положительной фазы, а в скважине 22 – 0-переходу от положительной к отрицательной фазе. При пикировании ОГ P1ar по положительному экстремуму в районе скв. 22

▼ Рис. 5. Сравнение количества полупериодов в одинаковом временном окне на стандартных сейсмических данных (слева) и на высокоразрешенных данных nSeis (справа).



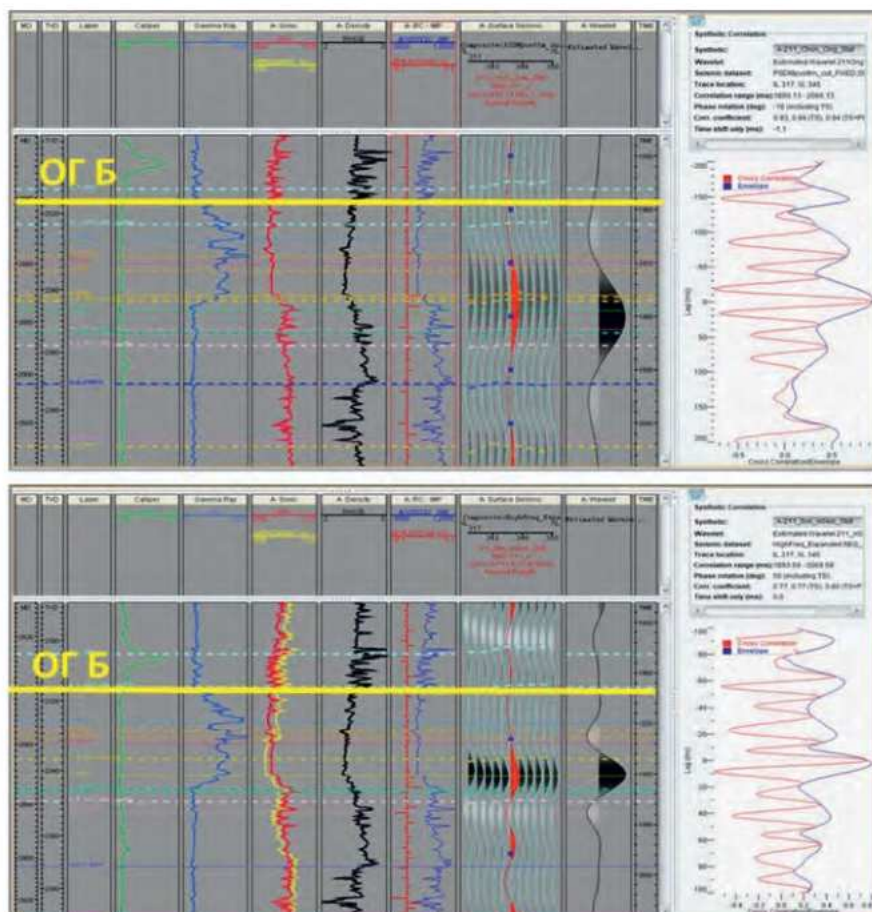


Рис. 6. Сравнение волновых полей в интервале баженовских отложений на планшетах привязки к стандартным сейсмическим данным (вверху) и к высокоразрешенным данным *nSeis* (внизу).

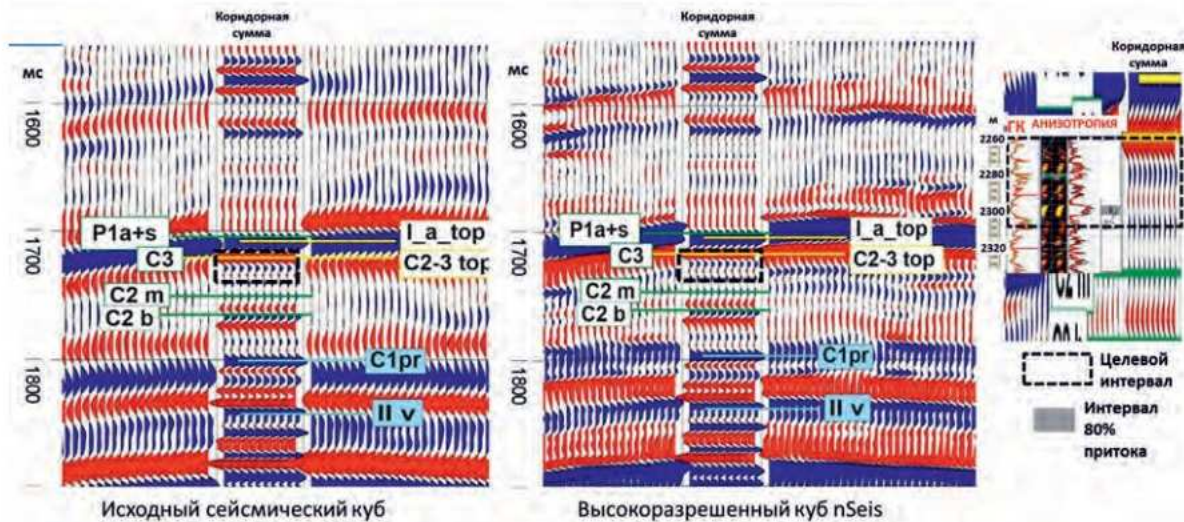
неизбежно отклонение пикировки от реального положения физической границы на 8-10 мс, или 12-18 м.

При повышении частоты волнового разреза часто случается, что высокочастотная волновая картина не соответствует ожиданиям. С одной стороны, закономерно увеличивается количество фаз на единицу времени. Так в интервале одного отрицательного полупериода шириной 20 мс, с экстремумом которого ассоциируется опорный отражающий горизонт Б в Западной Сибири (рисунок 5 слева, рисунок 6 вверху), за счет расширения спектра в 3 раза образуется до 4-5 полупериодов шириной от 3 до 6 мс (рисунок 5 справа).

С другой стороны, самый большой по амплитуде отрицательный экстремум, против ожиданий, соответствует не кровле баженовских отложений, а расположенному выше отрицательному

коэффициенту отражения в подошве тонкого плотного прослая (рисунок 6 внизу). А кровля отложений с высоким содержанием урановой составляющей (высокие значения ГК) [2], т.е. непосредственно кровля баженовских отложений на высокоразрешенных данных оказывается 10 мс ниже на 0-переходе от положительной к отрицательной фазе.

Отдельно нужно остановиться на оценке качества привязки с помощью коэффициента корреляции. При упоминании этой величины в тени остается такой немаловажный параметр, как окно корреляции, который в реальности является ключевым. Огромным заблуждением является считать корректным сопоставление коэффициентов корреляции синтетической и наблюдаемой сейсмических трасс в одинаковом окне для сейсмических данных разной частоты. С повышением частоты волнового



▲ Рис. 7. Сопоставление трассы коридорного суммирования со стандартными сейсмическими данными (слева), с высокоразрешенными данными nSeis (посередине), с данными ГИС (справа).

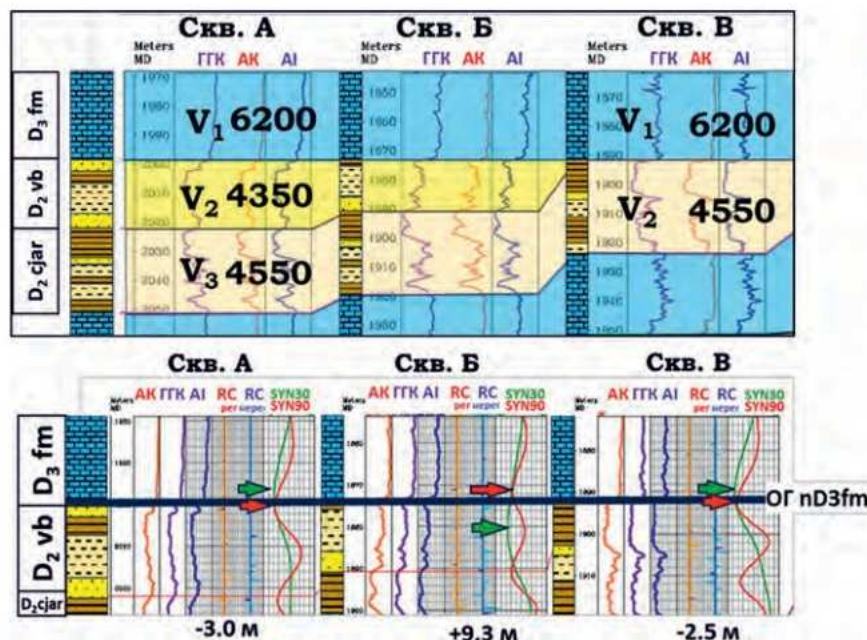
поля величина окна для расчета коэффициентов корреляции должна сокращаться пропорционально повышению частоты. Другими словами, в окне для расчета коэффициентов корреляции при сравнении разночастотных данных неизменным должно оставаться количество фаз. При сравнении коэффициентов корреляции в одинаковом окне значение коэффициента корреляции для высокочастотных данных закономерно будет ниже, чем для низкочастотных.

Привлечение трассы коридорного суммирования ВСП существенно облегчает задачу привязки. На рисунок 7 на панели справа в пунктирной рамке серым прямоугольником выделен интервал суперколлектора из которого получено 80% высокодебитного притока. На трассе коридорного суммирования кровле суперколлектора соответствует слабое отрицательное отражение. Та же трасса коридорного суммирования сопоставлена со стандартным сейсмическим разрезом (рисунок 7 слева) и с разрезом высокоразрешенных данных nSeis (рисунок 7 посередине). На стандартном разрезе слабое отражение от суперколлектора отсутствует, но прояв-

ляется на разрезе nSeis. Более того, видно, что это отражение, во-первых, неконформно опорному отражающему горизонту ОГ C2-3_top, а во-вторых, сильно латерально изменчиво. А значит, что прослеживание отражения непосредственно от кровли суперколлектора по высокоразрешенному разрезу позволит не только существенно повысить точность структурных построений, но и проследить характер изменения свойств этого пласта на площади.

Повышение точности структурных построений при перекоорреляция опорного отражающего горизонта по высокоразрешенному кубу происходит за счет того, что экстремум коррелируемой фазы в высокочастотном разрезе лучше соответствует физической границе, чем в низкочастотном.

Это объективный эффект можно проиллюстрировать на синтетической сейсмограмме, рассчитанной с импульсом разной частоты. На рис. 5 показана опорная граница ОГ nD3fm (подошва карбонатного фамена, поверхность эрозионного срезания) в 3 скважинах, вскрывающих данную границу в различных условиях. При постоянных свойствах



◀ Рис. 8. Сравнение положения отрицательного экстремума синтетических трасс, рассчитанных с импульсами Рикера на разной частоте, с положением физической границы на примере трех скважин (внизу). Пластовые скорости и толщины граничащих пластов (вверху).

вышележащего пласта (плотные высокоскоростные карбонаты) свойства нижележащего слоя отличаются: в скважинах А и Б изменяется толщина высокопористых песчаников, в скважине В снижается пористость песчаников (рисунок 8 вверху).

В скважине «А» отрицательный экстремум от этой границы на синтетической сейсмограмме, рассчитанной с импульсом Рикера 30Гц, выше на 3 м, чем отрицательный экстремум от этой же границы на синтетической сейсмограмме, рассчитанной с импульсом Рикера 90Гц (рисунок 8 внизу).

В скважине «Б» низкочастотный экстремум расположен на 9.3 м ниже высокочастотного, и в скважине «В» низкочастотный экстремум вновь выше высокочастотного. Но во всех скважинах физической границе лучше соответствует высокочастотный экстремум, что закономерно. Экспериментально проверено, что перекорреляция опорного отражающего горизонта по высокоразрешенному кубу позволяет повысить точность структурных построений на 20%: стандартное отклонение погрешности построений уменьшается с 10.5 м до 8.3 м, возрастает

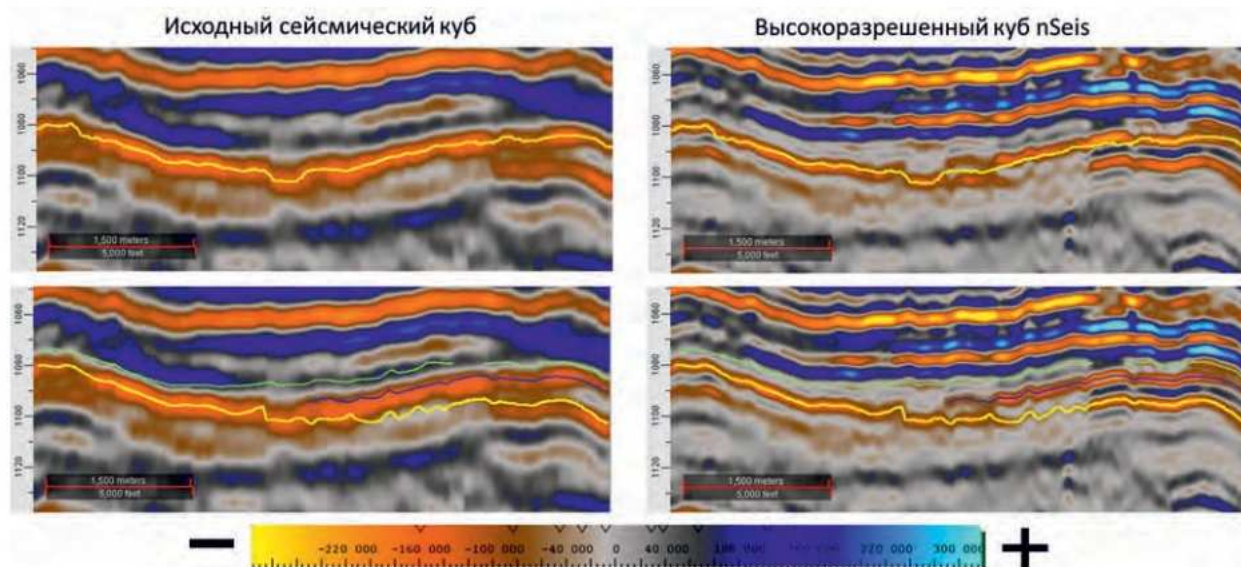
коэффициент корреляции время/глубина.

Перекорреляция отражающего горизонта по высокоразрешенным данным позволяет не только уточнить геометрию поверхности, но и существенно уточнить модель напластования. Пикировка горизонта на исходном разрезе выглядит, бесспорно, и однозначно (рис. 6, слева вверху), однако на высокоразрешенном разрезе та же пикировка явно противоречит волновой картине и нуждается в корректировке (рис. 6, справа вверху).

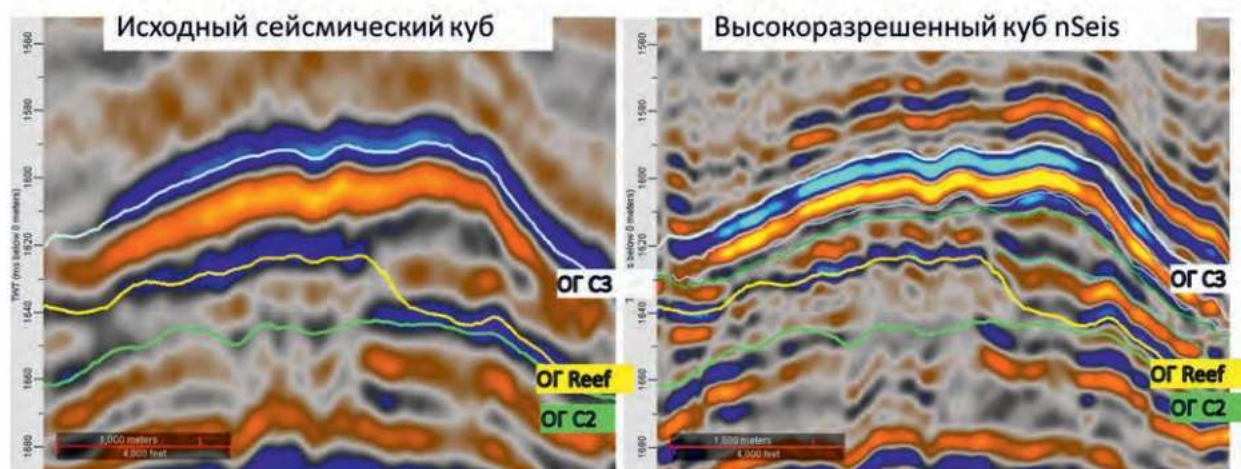
При перекорреляции горизонта по высокоразрешенному кубу проясняется картина эрозионной поверхности с налегающими отражениями (рисунок 9, справа снизу).

Возвращение новой пикировки на исходный разрез (рисунок 9, слева снизу) свидетельствует о необходимости перехода на другую фазу. Но на исходном разрезе совершенно не очевидно в каком месте и как перейти на другую фазу.

Повышение детальности волновых разрезов позволяет разобраться со строением сложных резервуаров, стано-



▲ Рис. 9. Сравнение двух вариантов пикировки горизонтов на стандартном кубе (слева) и высокоразрешенном кубе (справа). Вверху на оба разреза наложена пикировка, проведенная по исходному кубу. В нижнем ряду на разрезы наложена пикировка, проведенная по высокоразрешенному кубу.

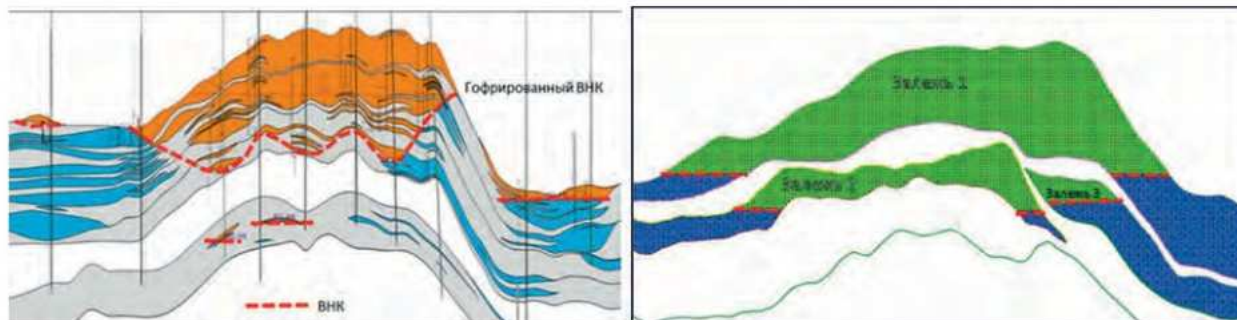


▲ Рис. 10. Неоднозначная пикировка кровли рифогенной постройки (ОГ Reef) на стандартных сейсмических данных (слева), беспорная пикировка кровли рифогенной постройки (ОГ Reef) на высокоразрешенных сейсмических данных (справа).

вится возможным проследить отражения от кровли локальных покрышек. Так, на рисунке 10 показан пример прослеживания ОГ Reef, разделяющего считавшийся ранее массивную рифогенную постройку на месторождении «А» на несколько циклов рифостроения.

Десятилетиями на месторождении «А» лучшие умы индустрии пытались построить геологическую модель, объясняющую скачки ВНК в соседних скважи-

нах амплитудой 65-70 м, при том, что стандартные сейсмические данные не давали оснований проводить разломы или разделять единый резервуар на части. В результате детальной корреляции по высокоразрешенную кубу единый резервуар месторождения был непротиворечиво разделен на несколько гидродинамически разобщенных залежей с самостоятельными горизонтальными уровнями ВНК. Месторождение «А»,



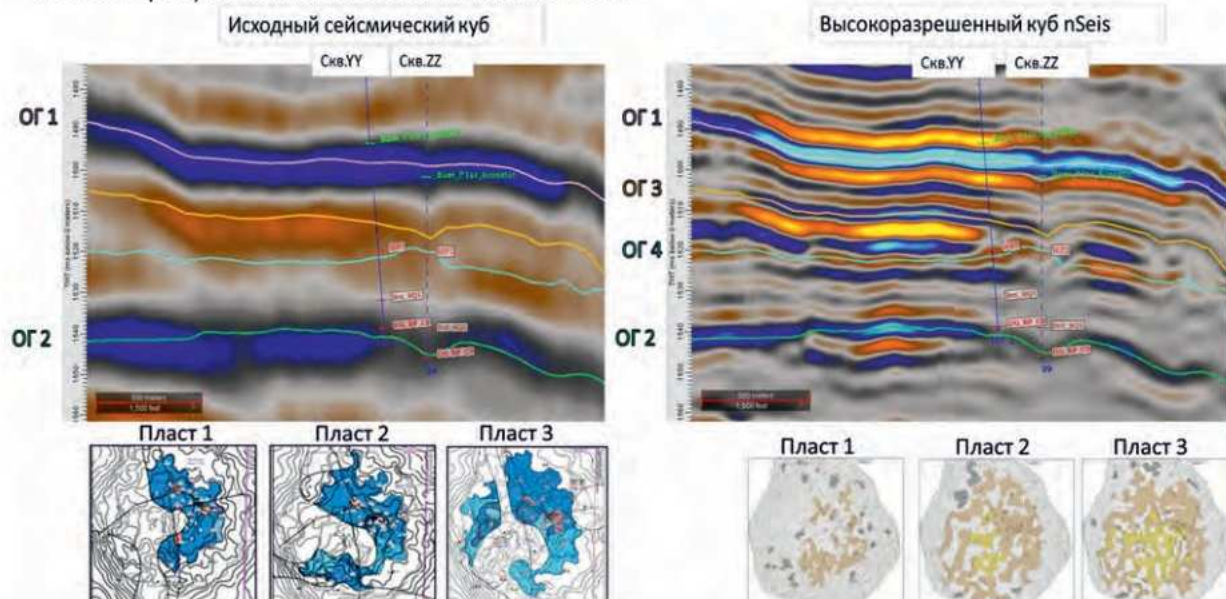
▲ Рис. 11. Сравнение геологических моделей месторождения А, построенных на основе стандартных сейсмических данных (слева) и на основе высокоразрешенного куба (справа).

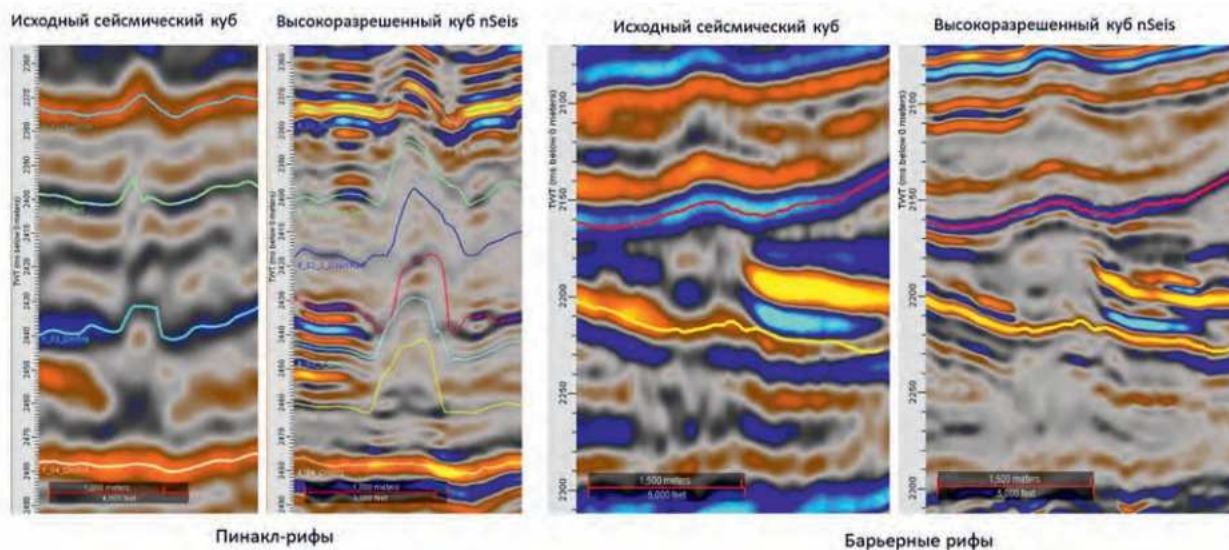
пережившее модель с «гофрированным» ВНК (рисунок 11, слева), модель «блокового строения» (не показано), обрело наконец непротиворечивую модель многослойного резервуара (рисунок 11, справа).

Карбонатные породы обладают более высокими скоростными и плотностными характеристиками, чем терригенные породы. Это влечет за собой объективно более низкую частоту волновой записи в интервалах карбонатного разреза. Зачастую на временных разрезах карбонатные отложения представляют собой широкие интерференционные отраже-

ния, не поддающиеся детальной интерпретации. Как, например, ассельско-сакмарские нижнепермские отложения Тимано-Печорского бассейна. По данным ГИС в разрезе скважин выделено 3 продуктивных пласта, на временном же разрезе доступно к пикировке только два отражения – в кровле и подошве всего комплекса (рисунок 12, слева). При повышении разрешенности могут быть прослежены границы всех трёх пластов, причем границы между пластами не являются конформными кровле и подошве всего комплекса (рисунок 12, справа), каждый слой обладает индивидуаль-

▼ Рис. 12. Вверху: Сравнение волновых картин стандартного разрешения (слева) и с расширением спектра (справа) в интервале ассельско-сакмарских карбонатных отложений Тимано-Печорского НГБ. Внизу: подсчетные планы трех нефтегазовых пластов, полученные по результатам интерпретации стандартной сеймики (слева) и высокоразрешенных сейсмических данных.





▲ Рис. 13. Изображение органогенных построек, замещающихся терригенными породами, на стандартных сейсмических разрезах (пинакл-риф А и барьерный риф В) и на высокоразрешенных сейсмических разрезах (пинакл-риф Б и барьерный риф Г).

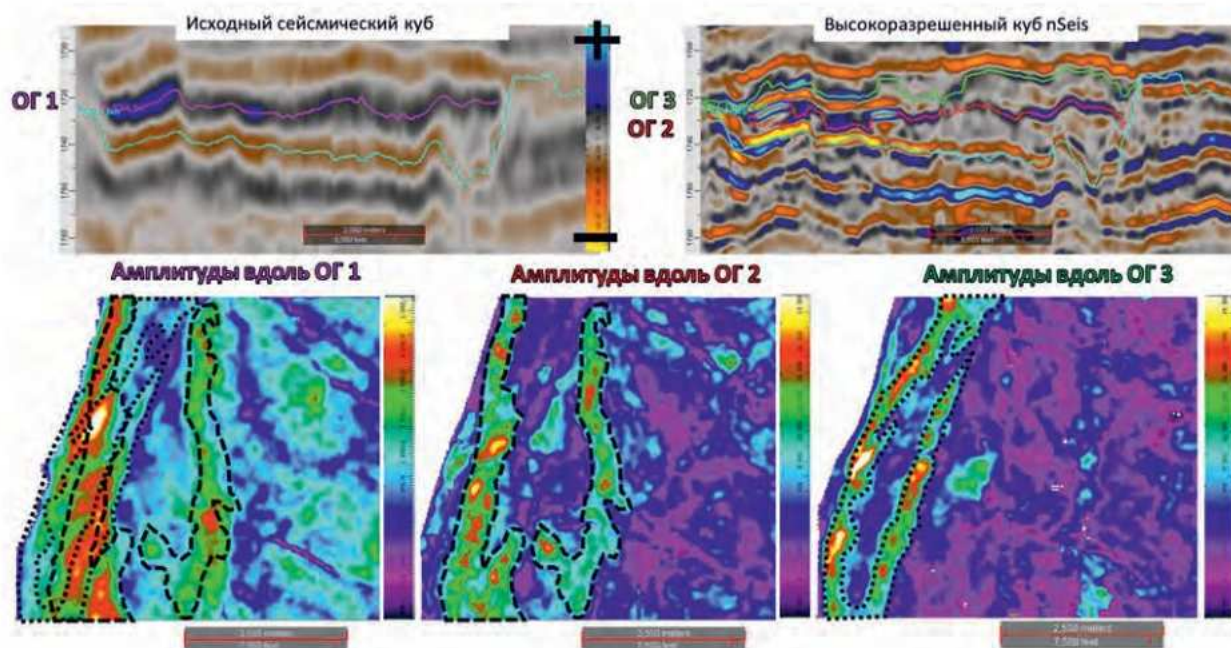
ным строением, от слоя к слою изменяется положение малоразмерных рифовых построек. В результате расширения спектра удалось перейти от условных литологических границ «по середине расстояния между скважинами с коллекторами и без коллекторов» к обоснованным сейсмическими данными границам фаций.

Неожиданным преимуществом расширения спектра сейсмической записи оказалась различная степень повышения частоты изображения в зависимости от исходного частотного состава, присущего породам разной литологии. Так, волновая картина в интервале высокоскоростных карбонатных пород в результате применения процедуры расширения спектра разрешается меньше, чем сопредельные низкоскоростные терригенные породы. Особенно убедительно это проявляется для рифогенных построек, вмещенных в терригенные толщи. На рисунке 13 показаны примеры таких ситуаций: для одиночного пинакл-рифа (А и Б) и для барьерной постройки (В и Г).

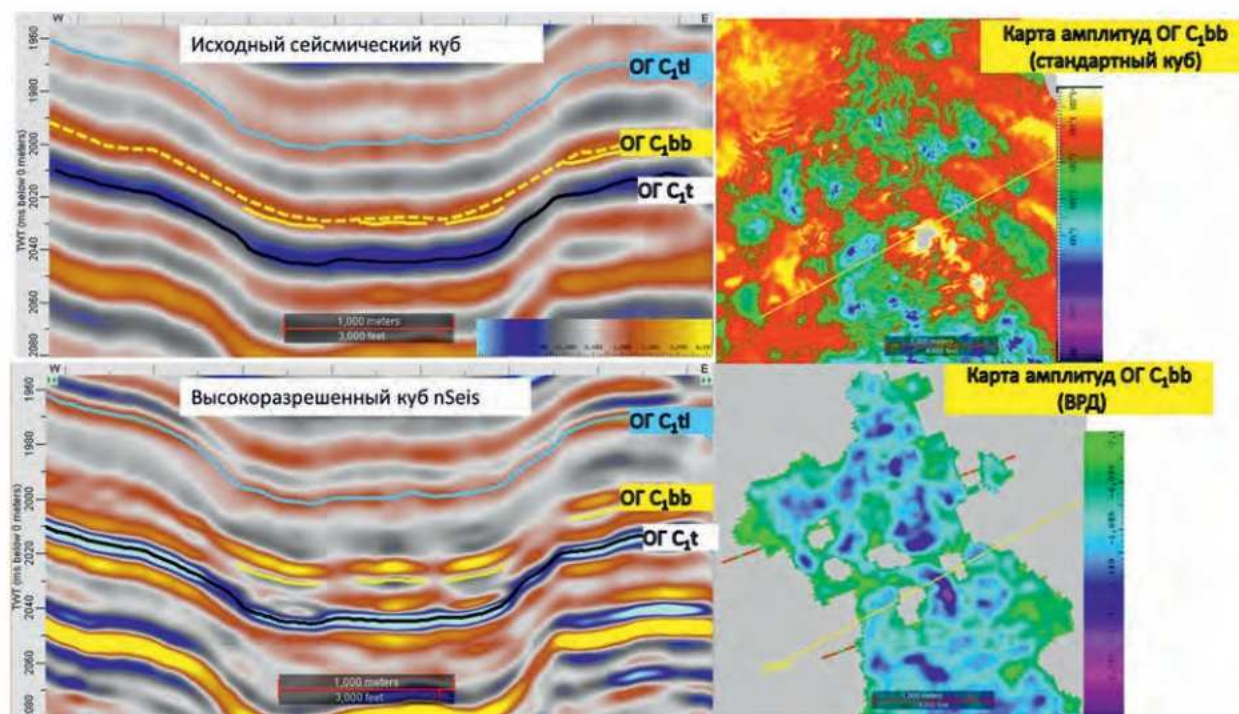
Из наблюдения, сделанного выше, следует, что для терригенных пород

процедура расширения спектра существенно эффективней, чем для карбонатных. Хотя точнее было бы сказать, что эффективность процедуры расширения спектра тем более эффективна, чем выше слоистость (или тонкослоистость) изучаемого геологического разреза, вне зависимости от того карбонатными или терригенными породами представлены эти слои.

При сопоставлении стандартных и высокоразрешенных сейсмических данных (особенно для терригенных пород) важно понимать, что амплитуды отражения от горизонта, прослеженного по низкоразрешенному кубу, являются интегральной характеристикой всех тонких слоев, которые можно проследить по высокоразрешенному кубу внутри того же временного интервала. Большим заблуждением является мнение, что доверять амплитудам высокоразрешенных кубов нельзя, потому что они не похожи на амплитуды низкоразрешенных данных. Они именно потому не похожи, что являются отражением характеристики только одного тонкого слоя из пачки слоев, неразделяемых на



▲ Рис. 14. Пример картирования русловых тел викуловской свиты.



▲ Рис. 15. Пропущенная литологически экранированная ловушка в песчаниках континентального (руслового) генезиса бобриковского возраста, закартировать которую стало возможно только на высокоразрешенных сейсмических данных.

стандартном кубе. Так на рисунке 14 показано сравнение волновых картин в интервале речного вреза. На левом разрезе во врезе возможно проследить только одно интерференционное отражение ОГ 1, в то время как на правом

можно проследить существенно больше (прослежено два: ОГ 2 и ОГ 3). Ниже представлены карты мгновенных амплитуд вдоль единственного отражения ОГ 1 и от пары отражений ОГ 2 и ОГ 3. Видно, что на картах амплитуд ОГ 2 и ОГ 3 про-

смаатриваются линейные аномалии типа «песчаные отмели» с различной конфигурацией. Наложение границ этих линейных аномалий на карту ОГ 1 демонстрирует то, что амплитуды ОГ 1 являются суммарным откликом от отдельных амплитудных аномалий двух отражений ОГ2 и ОГ3.

Именно возможность анализировать амплитуды тонких слоев по-отдельности – несомненное преимущество высокоразрешенных данных. Ниже на рисунке 15 (справа) показано какие четкие границы и выраженные меандрирующие формы геологических тел континентального (руслового, левийного и т.д.) генезиса проявляются на карте мгновенных амплитуд вдоль ОГ C1bb, прослеженного по высокоразрешенному кубу. При том, что на стандартном кубе эти тонкие неоднородности проявлены очень слабо и были пропущены при стандартной интерпретации.

Накопленный опыт работ с высокоразрешенными сейсмическими данными, полученными по результатам их дополнительной спец. обработки, убедительно свидетельствует о новых возможностях детализации сейсмогеологических моделей объектов в целевых интервалах разреза и выхода на построение более обоснованных и достоверных геологических моделей как под цели подсчета запасов, так и для оптимизации разработки.

Литература:

1. Куркин А.А. Оценка пространственного распределения погрешности структурных построений. // Нефть и газ. №1 2016, с. 18-21.
2. Хабаров В.В., Нелепченко О.М., Волков Е.И., Борташевич О.В. Уран, калий и торий в битуминозных породах баженновской свиты Западной Сибири. Советская геология. 1980. № 10. С. 94–105.