

Технологии сейсморазведки, № 3, 2015, с. 80-88

doi:

http://ts.sbras.ru

УДК 550.8:551.763.3(571.121)

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ (на примере верхнемеловых отложений севера западной сибири)

# В.А. Жемчугова, М.О. Бербенев, Ю.В. Наумчев

ООО "Геофизические системы данных", 117198, Москва, Ленинский просп., 113/1, Парк Плэйс, офис E-322, Россия e-mail: info@gds.ru, zem@gds.ru, berbenev@gds.ru, y.naumchev@gmail.com

Использование технологии адаптивной вибросейсморазведки позволило существенно увеличить информативность сейсмических материалов и детализировать сложное геологическое строение сеноманских и туронских природных резервуаров севера Западной Сибири. Включение результатов седиментологических и петрофизических исследований в технологическую цепочку комплексной интерпретации геолого-геофизических данных дало возможность охарактеризовать фильтрационно-емкостные свойства резервуаров с учетом особенностей строения порового пространства разнофациальных отложений.

Верхнемеловые отложения, седиментационное моделирование, литолого-фациальный анализ, сейсмофациальное районирование, обстановки осадконакопления, резервуар

## IMPROVING OF FIELD EXPLORATION BY NEW SEISMIC TECHNOLOGIES IMPLICATION (case study of western siberia upper cretaceous deposits)

## V.A. Zhemchugova, M.O. Berbenev, Yu.V. Naumchev

Geophysical Data Systems Ltd., 117198, Moscow, Leninskiy Prospect, 113/1, Park Place, Office E-322, Russia e-mail: info@gds.ru, zem@gds.ru, berbenev@gds.ru, y.naumchev@gmail.com

Applying of adaptive seismic technology (AviSeis) data allowed to considerably increase seismic data resolution and definition of Cenomanian and Turonian reservoir structure at the North of Western Siberia basin. Implementation of integrated sedimentological and petrophysics data into modeling project allowed to derive reservoir properties distribution trough void structure characteristics of polyfacies deposits.

Upper Cretaceous deposits, sedimentological modeling, lithofacies analysis, seismic facies analysis, depositional environments, reservoi

## введение

Экономическая привлекательность освоения запасов углеводородов, приуроченных к верхнемеловым отложениям северных регионов Западной Сибири (рис. 1), объясняется, помимо значительных объемов этих запасов, небольшими (до 1 км) глубинами залегания содержащих газ резервуаров. Однако последнее обстоятельство обусловливает низкую информативность сейсмических данных, полученных с помощью стандартных методик проведения полевых сейсморазведочных работ. Применение новой технологии адаптивной вибросейсморазведки (АВИС) существенно повысило разрешенность сейсмических данных (рис. 2), а их использование в технологической цепочке комплексной интерпретации геолого-геофизических данных позволило разработать детальные модели резервуаров, необходимые для рационального освоения месторождений.

Осадочные тела характеризуются широким спектром факторов, определяющих их фильтрационно-емкостные свойства, при этом доминирующую роль среди них играют седиментационные признаки. Следовательно, одним из необходимых условий повышения достоверности прогноза характеристик природных резервуаров является ретроспективный анализ условий формирования потенциальных коллекторов и покрышек, позволяющий реконструировать специфику процессов осадконакопления в пространстве и времени.

#### © Жемчугова В.А., Бербенев М.О., Наумчев Ю.В., 2015

#### СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРОВ

Верхнемеловые отложения региона включают два крупных резервуара газа: сеноманский и туронский. Генетическая типизация осадков, слагающих эти резервуары, и выделение фаций базировались на анализе их вещественного состава, текстурных и структурных характеристик, на диагностике ихнофаций и сравнении этих осадков с современными аналогами. Найденные закономерности в распределении фаций в разрезе скважин, охарактеризованных керновым материалом, служили основой седиментологической интерпретации каротажных данных в тех частях разреза, где керн отсутствовал [Муромцев, 1984; Селли, 1989]. Для прогноза распределения фаций в межскважинном пространстве использовались результаты атрибутного анализа сейсмических данных.

Сеноманские резервуары представлены сложно построенной алевро-песчано-глинистой толщей, накопление которой происходило в условиях приливно-отливного побережья и прилегающей сублиторали. Результаты генетического анализа керна скважин свидетельствуют о том, что повсеместно разрез сеномана имеет четко выраженное ретроградационное строение, отражающее последовательное увеличение "мористости" слагающих его осадков. В нижней части разреза преобладают глинисто-алевролитовые отложения приливно-отливных равнин. На это



**Рис. 1.** Карта нефтегазогеологического районирования северной части Западно-Сибирского НГБ [Нефтегазоносные провинции..., 1983, с дополнениями и изменениями]:

1–4 – границы: 1 – Западно-Сибирского НГБ, 2 – нефтегазоносных областей (I – Ямальской, II – Гыданской, III – Пайдугинской, IV – Фроловской, V – Надым-Пурской, VI – Пур-Тазовской, VII – Среднеобской), 3 – структур первого порядка (мегавалов и сводов), 4 – контуры месторождений; 5 – мегавалы и своды; 6–8 – месторождения: 6 – нефтяные, 7 – газовые и газоконденсатные, 8 – нефтегазоконденсатные; 9 – населенные пункты.

указывают пологоволнистая, волнисто-линзовидная и горизонтальная слоистость отложений, обилие мелкого углистого детрита и многочисленные следы жизнедеятельности организмов. По своему облику отложения очень близки к современным приливно-отливным осадкам Северного и Адриатического морей [Рейнек, Сингх, 1981]. Спорадически встречаемые в разрезе средне- и мелкозернистые песчаники с крупной косой и косой бимодальной слоистостью, подстилаемые массивными песчаниками с галькой нижележащих отложений и с обломками глин и перекрываемые мелкозернистыми песчаниками с линзовидно-волнистой слоистостью мелкой ряби течений, представляют собой отложения прирусловых отмелей приливноотливных каналов и более крупных флювиальных потоков.

Генерализованное углубление бассейна отражается в увеличении в разрезе доли литоральных, а затем и сублиторальных отложений; одновременно с этим расширяется площадь распространения и увеличиваются объемы песчаного материала. Наибольшее развитие песчаники имеют в верхней части сеномана, где они сложены средне-мелкозернистыми разностями, с массивной, косой и косой бимодальной текстурами. Как правило, вверх по разрезу обломочный материал утоняется, в нем увеличивается глинистая составляющая, появляются средне-мелкозернистые алевролиты со слоистостью мелкой ряби волнений (рис. 3).

Продуктивные песчаники характеризуются высокими значениями фильтрационно-емкостных параметров, но не выдержаны по площади и изменчивы по разрезу. Зачастую даже соседние эксплуатационные скважины, расположенные на расстоянии 50–100 м друг от друга, обладают своеобразными типами разрезов, трудно сопоставляемыми между собой. Возможный путь решения такой проблемы – использование изохронных поверхностей выравнивания, отражающих моменты резкой смены режима седиментации на обширной территории в геологическом прошлом [Mitchum, 1977]. Для отложений, накопившихся в прибрежноморских обстановках, таким идентифицируемым событием является повышение относительного уровня моря (OVM). Вызванное этим процессом увеличение пространства аккомодации приводит к морскому затоплению прибрежных



Рис. 2. Сопоставление материалов стандартной сейсмической съемки (А) и высокоплотной съемки АВИС (Б).

областей; в континентальных условиях оно отражается в смене существенно песчаной седиментации глинистой и(или) углистой (рис. 4).

Туронские резервуары сложены преимущественно шельфовыми осадками. Пористостью в них обладают тонкозернистые песчаники и крупнозернистые алевролиты. Предполагается, что их накопление связано с подводными поднятиями, в пределах которых формировались шельфовые бары или песчаные валы [Hobson et al., 1982; Boyles, Scott, 1982; Knight, McLean, 1986]. Резервуар сформирован несколькими осадочными последовательностями, каждая из которых начинается с шельфовых глин, переходящих вверх по разрезу в тонкослоистые алевриты со следами зарывающихся организмов и знаками ряби, а выше – в тонкозернистые пески с горизонтальной ламинарной и(или) косой слоистостью (рис. 5).

Одним из наиболее изученных примеров шельфовых песчаных баров, залегающих непосредственно на шельфовых глинах, являются песчаники Шеннон (Shannon Sandstones) в Вайоминге. Однако и в отношении них остается дискуссионным вопрос о том, как песчаный материал транспортировался от береговой линии на многие сотни километров (песчаники Шеннон, например, располагаются на расстоянии 160 км от берега) и почему он не осаждается на путях переноса, концентрируясь в локальной зоне. Даже учитывая тот факт, что основные области аккумуляции песчаного материала в виде шельфовых баров (или песчаных валов) приурочены к топографически выраженным поднятиям на дне моря. Подвергается сомнению и возможность влияния такого поднятия на дифференциацию осадка, учитывая, что высота этого поднятия составляет первые метры, в то время как глубина моря — несколько десятков метров.

В основе альтернативной модели формирования последовательностей, генезис отложений в которых связан с разнесенными в пространстве обстановками осадконакопления, лежит предположение о возможности быстрой смены шельфовой седиментации прибрежной в результате флуктуаций относительного уровня моря. В такой трактовке накопление тонкодисперсного материала происходит в шельфовых условиях во время высокого стояния, а алевритового и песчаного – во время падения и низкого стояния уровня моря.

Изучение туронских отложений, выполненное для разных районов севера Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, позволило высказать предположение о том, что в формировании этих отложений реализованы обе модели, и архитектура туронского резервуара является функцией двух переменных: рельефа дна, контролирующего распределение различных по гранулометрии осадков по латерали, и относительного уровня моря, определяющего вертикальную последовательность наслоения этих осадков. При этом вынос обломочного алевритового и песчаного материала на шельф происходил не во время падения относительного уровня моря, а, напротив, в завершающую фазу его высокого стояния, отвечающую нормальной регрессии. По мере миграции фаций шельфовая обстановка сменялась транзитной, куда выносился более грубозернистый, чем пелитовый, осадок, распределяемый затем волнами и течениями. Поднятия в рельефе дна служили



Рис. 3. Сопоставление выделенных по керну литогенетических типов покурских отложений и их каротажных образов:

1–10 – литологическая характеристика: *1* – песчаники средне- и крупнозернистые, *2* – песчаники мелкозернистые алевролиты , *5* – переслаивание алевролитов и глин с преобладанием алевритовой компоненты, *6* – глины алевритистые и алевролиты глинистые, *7* – переслаивание алевролитов и глин с преобладанием глинистой компоненты, *8* – глины алевритистые и алевролиты глинистые, *10* – песчаники с карбонатным цементом; 11–20 – текстурная характеристика: *11* – массивная, *12* – брекчиевидная, *13* – взмучивания, перемятия и оползания осадка, 14–20 – слоистая текстура, слоистость: *14* – горизонтальная параллельная, *15* – наклонная параллельная, *16* – горизонтально-волнистая, *17* – линзовидная, *18* – линзовидно-волнистая (флазерная), *19* – косая бимодальная, *20* – косая однонаправленная; 21–30 – осадочные комплексы: *21* – мелководно-морские, *22* – переходной зоны, *23* – нижнего пляжа и верхней предпляжевой зоны, *24* – приливно-отливных каналов, *25* – смешанной песчано-илистой литорали, *26* – илистой литорали, *30* – внутренней глинистой поймы и болот; *31* – трансгрессивные поверхности; *32* – поверхности размыва; *33* – глинистые интракласты.

своеобразными ловушками этого осадка, формируя аккумулятивные тела, называемые авторами различно — "шельфовые бары", "песчаные гряды", "оффшорные бары" и т. д., но в основе их накопления, вероятно, лежит единый механизм и близкие седиментационные процессы.

Во время последующего повышения ОУМ эти бары "притоплялись", и на их месте накапливался преимущественно глинистый материал. Повторяясь, этот процесс привел к формированию циклически построенного разреза туронского резервуара со сложным распределением коллекторов (см. рис. 5).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Неотъемлемой частью прогноза структуры и свойств природных резервуаров является седиментологическая интерпретация сейсмических данных, и в первую очередь атрибутный анализ. Под сейсмическими атрибутами здесь понимается не только стандартный набор динамических параметров волновой картины, но также результаты псевдоакустической (или псевдоупругой) инверсии, AVOатрибуты, карты временных толщин между горизонтами и т. д. Выбор окон для расчета динамических атрибутов вы-



Рис. 4. Литолого-фациальный разрез сеноманских отложений:

1 – трансгрессивные поверхности, 2 – границы песчаных тел, 3 – эрозионные поверхности, 4–9 – осадочные комплексы: 4 – шельфа, 5 – переходной и нижней предпляжевой зоны, 6 – верхней предпляжевой зоны и берегового склона, 7 – межприливной зоны (a) с приливно-отливными каналами (б), 8 – прибрежной континентальной равнины, 9 – приливно-отливных отмелей и русловых песков, 10 – индексы циклитов (пластов).





1–3 – литологическая характеристика в разрезах скважин: *1* – алевролиты, *2* – переслаивание алевролитов и глин, *3* – глины; 4–5 – границы: *4* – циклитов (пластов), *5* – осадочных тел; *6* – эффективные толщины; 7–9 – осадочные комплексы: 7 – шельфа, *8* – центрального бара, *9* – тылового бара.

полняется на основе сейсмической привязки и сейсмогеологического моделирования, основанного на петрофизических зависимостях упругих и емкостных параметров [Жуков и др., 2006].

Большинство сеноманских газонасыщенных резервуаров хорошо отражается в сейсмическом волновом поле (рис. 6), неоднородности которого чаще всего связаны с песчаными телами руслового генезиса. Для выделения русловых аномалий наиболее информативными представляются стратиграфические срезы сейсмических кубов амплитуд, псевдоакустического импеданса и "структурных" атрибутов (когерентность/"Similarity", "Dip-Azimuth" и



Рис. 6. Сейсмофациальное районирование сеноманских отложений и прогноз развития песчаных коллекторов в межскважинном пространстве:

А – Сейсмический срез на уровне 18 мс ниже ОГ Г; Б – карта средних значений псевдоакустического импеданса в окне 12–28 мс ниже ОГ Г; В – карта распределения фаций в пласте ПК<sub>1</sub><sup>2</sup>; Г – карта спектральной декомпозиции, рассчитанной в окне 25–55 мс ниже ОГ Г (30–40–50 Гц); Д – карта средних значений псевдоакустического импеданса в окне 0–10 мс выше ПК<sub>2</sub>; Е – карта распределения фаций в пласте ПК<sub>1</sub><sup>3</sup>; Ж – космоснимок современного приливно-отливного побережья, р. Намитангуэрэ (*Nhamitenguere*), Мозамбик: I – полигоны тектонических нарушений; 2 – положение долин и промоин древних русся и каналов; 3 – положение древних русся, нарушающих сплошность подстилающего циклита; 4-5 – маркеры русловых аномалий, диагностированных в волновом поле: 4 – в перекрывающем циклите, 5 – в подстилающем циклите; 6 – газонефтяной контакт; 7 – границы литолого-фациальных зон; 8-10 – осадочные комплексы: 8 – прирусловых отмелей, 9 – смешанной алевро-глинистой литорали, 10 – глинистой литорали; 11 – долевое участие литотипов в разрезе скважины.



**Рис. 7.** Отображение на временных разрезах эрозионного вреза в верхнем циклите туронских отложений.



**Рис. 8.** Модели пространственного распределения геолого-петрофизических параметров: Α – плотности; Б – фаций; В – пористости; Γ – проницаемости.

т. п.). На этих срезах достаточно уверенно диагностируются палеорусла по характерным изгибам (меандрам), приливно-отливные каналы — по узкой спрямленной форме аномалий, а также отдельные элементы системы — протоки, старичные петли и т. д. (рис. 6). В ряде случаев такой "послайсовый" анализ позволяет зафиксировать положение русла в разный момент времени по мере его смещения и формирования долины в течение ее жизненного цикла. Достаточно часто на срезах наблюдаются отдельные элементы более молодых русловых систем, которые накладываются на более древние, секут их, формируя в плане характерные "перекрестия" на картах атрибутов.

В условиях приливно-отливных равнин, отложения которых слагают бо́льшую часть сеноманских резервуаров, основными областями накопления песчаного материала являются прирусловые отмели и косы. На картах сейсмических атрибутов для них характерны серповидные, овальные или изометричные продолговатые формы, повторяющие изгибы и петли закартированных русел. Обычно представляется возможным зафиксировать только "конечное" положение русла, наиболее контрастно отраженное в волновом сейсмическом поле по отношению к глинам пойменных равнин.

Во временном интервале развития туронских газонасыщенных резервуаров такие русловые аномалии отсутствуют, да и весь разрез характеризуется существенно меньшей "акустической выразительностью". Исключение составляет верхний седиментационный циклит –  $T_1^1$  (см. рис. 5), изменчивый не только по свойствам, но и по стратиграфической полноте (рис. 7), что обусловлено субаэральным размывом отложений во время предконьякского падения ОУМ и быстрого осушения некогда достаточно глубокого (20–30 м) моря.

#### РАЗРАБОТКА ОБЪЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЗЕРВУАРОВ

Одной из задач, решение которой определяет повышение эффективности разработки залежей углеводородов в резервуарах, характеризующихся сложным распределением коллекторов, является создание объемных цифровых моделей резервуаров, в которых учитываются закономерности трехмерного распределения фильтрационно-емкостных характеристик. Такая модель была разработана для верхнемеловых отложений Русско-Чассельского вала. Исходными данными для моделирования структуры и свойств этого объекта послужили следующие результаты:

 – фациальных реконструкций, реализованные в виде набора кривых фаций, построенных по скважинным данным, – керна и данных ГИС;

 петрофизических исследований керна (включая рентгеновскую микротомографию);

 интерпретации сейсмических данных АВИС, и в первую очередь куб плотности, полученный после проведения упругой инверсии.

Объемное распределение фаций рассчитывалось методом последовательного гауссова моделирования (SIS) на основе вариограммного анализа. При этом учитывалось долевое участие фаций в разрезах скважин. Куб плотности, полученный в результате синхронной инверсии, использовался в качестве объемного тренда (рис. 8 А, Б).

Наличие устойчивых зависимостей между параметрами плотности и пористости в пределах каждой фации позволил рассчитать куб пористости, сформированный отдельными элементами, в каждом из которых математическое распределение пористости характеризует автономную фацию (рис. 8, В). В структуре сеноманского и туронского резервуаров коллекторы развиты очень широко и характеризуются высокими значениями открытой пористости (ее граничные значения составляют 27 % для сеноманских и 24.3 % для туронских коллекторов), что связано в первую очередь с низкой степенью литификации обломочного материала. При этом коллекторам свойственны крайне изменчивые значения газопроницаемости. Соотношение пористости и проницаемости коллекторов определяется строением их пустотного пространства. В обломочных коллекторах параметры этого пространства зависят преимущественно от структурных характеристик породы; последние, в свою очередь, контролируются условиями седиментации обломочного материала.

Для выявления взаимосвязи между условиями образования коллекторов и их фильтрационно-емкостными свойствами были выполнены лабораторные исследования образцов керна ряда скважин с одновременной диагностикой их генезиса. В результате общая выборка была разделена на кластеры, объединяющие несколькие фаций с близкими характеристиками емкости; для каждого из них определена автономная зависимость проницаемости от пористости. Использование результатов томографии позволило рассчитать куб проницаемости с учетом особенностей строения пустотного пространства разнофациальных отложений (рис. 8, Г).

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный нами подход, базирующийся на результатах комплексной интерпретации сейсмических и скважинных данных, направлен на повышение достоверности прогноза структуры и свойств природных резервуаров – основных вместилищ углеводородов. Применение методики АВИС повысило разрешенность сейсмических данных, что позволило существенно детализировать строение продуктивных объектов в межскважинном пространстве. В свою очередь, внедрение в процесс комплексной интерпретации данных лабораторных исследований и рентгеновской микротомографии образцов керна дало возможность выявить устойчивые зависимости петрофизических параметров коллекторов от упругих характеристик среды и в результате – разработать трехмерные модели распределения не только пористости, но и проницаемости коллекторов.

Полученные результаты уточняют и дополняют существовавшие до этого времени представления о строении и условиях образования верхнемеловых резервуаров углеводородов и позволяют обоснованно планировать работы по дальнейшему геолого-геофизическому изучению и разбуриванию территории; кроме того, они являются надежной основой для гидродинамического моделирования залежей.

#### Литература

Жуков А.П., Жемчугова В.А., Эпов К.А., Федотов С.Л. Прогнозирование структуры и свойств природных резервуаров на основе комплексной интерпретации сейсмических и скважинных геолого-геофизических данных // Технологии сейсморазведки. 2006. № 1. С. 69–78.

**Муромцев В.С.** Электрометрическая геология песчаных тел – литологических ловушек нефти и газа. Л.: Недра, 1984. 260 с.

Нефтегазоносные провинции СССР (справочник) / под ред. Г.Х. Дикенштейна, С.П. Максимова, В.В. Семеновича. М.: Недра, 1983.

Рейнек Г.Э., Сингх И.Б. Обстановки терригенного осадконакопления. М.: Недра, 1981. 439 с. Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. М.: Недра, 1989. 294 с.

**Boyles J.M., Scott A.J.** A model for migrating shelf-bar sandstones in the Upper Mancos Shale (Campanian), Northwestern Colorado, Wyoming // AAPG. 1982. Bull. 66. P. 491–508.

Hobson J.P., Fowler M.L., Beaumont E.A. Depositional and statistical exploration models, Upper Cretaceous offshore sandstone complex, Sussex Member, House Creek field. Wyoming // AAPG. 1982. Bull. 66. P. 689–707.

Knight R.J., McLean J.R. Shelf sands and sandstones // Canadian Soc. of Petrol. Geologists. 1986. Bull. 11.

**Mitchum R.M.** Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Pt. 1: Glossary of terms used in seismic stratigraphy // Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration. Tulsa, Oklahoma. AAPG. 1977. Mem. 26. P. 205–212.

> Поступила 16 мая 2015 г., в окончательном варианте — 8 июля 2015 г.

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*ЖЕМЧУГОВА Валентина Алексеевна* – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный геолог ООО "Геофизические системы данных". E-mail: zem@gds.ru

*БЕРБЕНЕВ Максим Олегович* – ведущий геолог ООО "Геофизические системы данных". E-mail: berbenev@gds.ru

*НАУМЧЕВ Юрий Владимирович* – геолог ООО "Геофизические системы данных". E-mail: y.naumchev@gmail.com