

А.П. Жуков
В.А. Жемчугова
К.А. Эпов
С.Л. Федотов

ООО «Геофизические системы данных»
ООО «Геофизические системы данных»
ООО «Геофизические системы данных»
Fugro-Jason

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ И СКВАЖИННЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Введение

Успешная эксплуатация месторождений нефти или газа невозможна без знания геологического строения природного резервуара, элементы которого определяют возможности аккумуляции углеводородных флюидов в залежи и, в конечном итоге, контролируют продуктивность месторождения. Опыт проектирования и эксплуатации залежей свидетельствует о том, что для адекватного математического моделирования пластовых систем, оптимизации технологических схем разработки, повышения эффективности воздействия на пласт, необходимо выявление закономерностей распределения в разрезе и площади разнофациальных образований, обладающих неодинаковым емкостным потенциалом, определение характера их гидродинамической связи и сообщаемости по вертикали и латерали.

Для решения таких задач в компании «Геофизические системы данных» совместными усилиями геологов и геофизиков была разработана технология прогнозирования структуры и свойств природных резервуаров на базе комплексной интерпретации скважинных геолого-геофизических данных и материалов 3D-сейсморазведки, основные положения которой рассмотрены в предлагаемой статье.

По мнению авторов, при современном состоянии производственной сейсморазведки давно назрела необходимость в разработке такой технологии. К сожалению, сегодня встречается большое количество публикаций по интерпретации сейсмических данных, в которых результативные геологические модели целевых интервалов приводятся практически безо всякого обоснования. В современной технологической цепочке производственного процесса интерпретации сейсмических данных, как правило, отсутствует время и место для изучения первичной геологической информации, что зачастую порождает самые фантастические геологические гипотезы, привлекаемые для интерпретации временных разрезов и каротажных диаграмм. С другой стороны, прогноз структуры природных резервуаров и фильтрационно-емкостных свойств слагающих их отложений, базирующиеся на литолого-фациальном и петрофизическом анализах, осуществляется, как правило, без использования сейсмических материалов. Такая взаимная «невостребованность» результатов работ геологов и геофизиков снижает степень достоверности автономно создаваемых ими моделей

природных объектов. На преодоление такой автономности и направлена рассматриваемая в статье технология, причем в ней преднамеренно смещены акценты в сторону методических приемов изучения не столько сейсмической, сколько геологической (и в первую очередь литологической) информации. Такой подход обусловлен необходимостью осуществления жесточайшего «седиментационного» контроля процесса интерпретации геофизических данных, поскольку только с помощью адекватной седиментационной модели, разработанной с использованием новейших достижений научной и практической геологии, можно определить, какие осадочные тела будут присутствовать на изучаемом участке, каков характер наложения в этих телах, как и куда они могут смещаться в течение седиментационного цикла или его фазы, а, соответственно, и каким образом эти тела могут отображаться в волновом поле. Одновременно, особенности изменения последнего служат для детализации седиментационной модели, т.е. комплексная интерпретация геолого-геофизических данных в понимании авторов статьи – процесс многоактный, предусматривающий неоднократные итерации.

Помимо этого, использование детальных литологических исследований позволяет прогнозировать «внутреннее наполнение» осадочных тел и его изменение в пространстве и времени, зачастую не отображающиеся в сейсмических характеристиках в силу определенной разрешающей способности сейсморазведки.

Примечательным является и тот факт, что последовательные этапы описываемого здесь подхода хорошо известны специалистам в различных областях и не являются «эксклюзивными» наработками. Однако основная сложность состоит в том, чтобы осуществить комплексирование геологических и геофизических методик для получения оптимального с точки зрения обеих дисциплин результата.

Процедура седиментационно-емкостного моделирования разбивается на три этапа (рис. 1). **Первый** - подготовительный, охватывает исследования скважинных данных, направленные на определение возраста слагающих природный резервуар пород и выявления основных особенностей их строения. Они проводятся в рамках биостратиграфического, литолого-петрографического анализов и качественной интерпретации ГИС. Результатом этих исследований является модель биостратиграфического расчленения разреза. Кроме того, по детальному макро- и микроскопическому описанию пород выделяются основные «седиментационные маркеры», представляющие собой осадочные тела, в строении которых зашифрованы резкие изменения процессов осадконакопления. Как правило, они хорошо проявляются как на каротажных кривых, так и в волновом поле.

К ним в первую очередь относятся *эрозионные границы* с признаками субаэральности, фиксирующие перерывы в осадконакоплении, *трансгрессивные поверхности*, отражающие рост аккомодационного пространства, связанного с повышением относительного уровня моря (и как их ча-

стный случай - поверхности максимального затопления), пласты «индекс-литотипы» - индикаторы условий накопления и/или преобразования осадков.

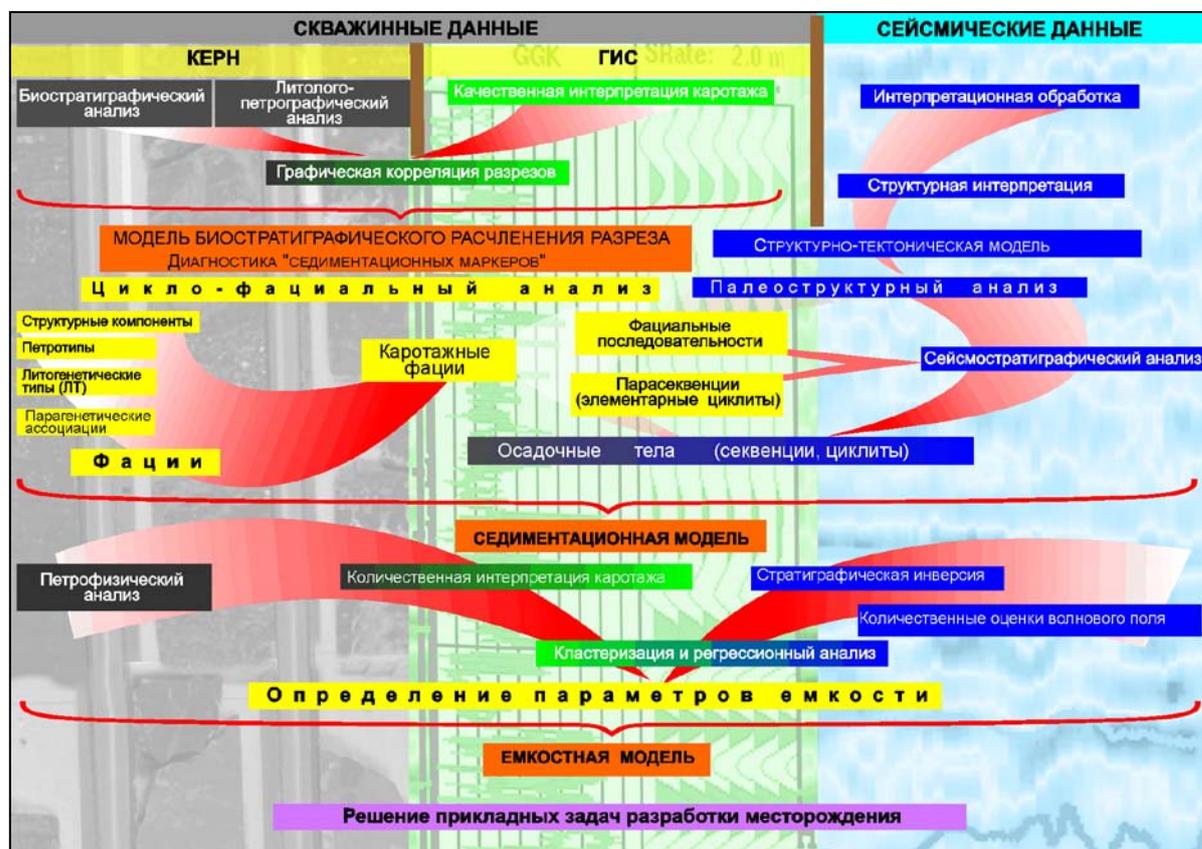


Рис. 1. Технологическая цепочка построения модели природного резервуара.

Основная задача **второго** этапа – разработка седиментационной модели природного резервуара. Ее решение базируется на результатах циклофациального, структурно-тектонического и сейсмостратиграфического анализов.

Седиментационное моделирование представляет собой одну из ветвей историко-геологических исследований, опирающуюся на комплексное использование фациального и циклического анализов. Его становление и развитие связаны с уникальными, не потерявшими своего значения до настоящего времени работами Н.Б. Вассоевича, Ю.А. Жемчужникова, Г.Ф. Крашенинникова, Д.В. Наливкина, Л.В. Пустовалова, Л.Б. Рухина, Н.М. Страхова, С.В. Тихомирова. Заложенные еще в середине прошлого столетия методические приемы изучения осадочных толщ с целью восстановления истории их образования позднее дополнились рядом усовершенствований, возникших благодаря эволюции представлений геологов о процессах осадконакопления. В конце семидесятых годов в геологии появилось новое научное направление, развивающееся на стыке традиционных геологических методов, идеологически объединившее приемы фациального и циклического анализов. Оно получило название метода стратиграфии секвенций - Sequence

stratigraphy [6,7]. Применение этого метода в практике нефтегазопроисловых работ показало его высокую эффективность, и в первую очередь для прогноза природных резервуаров и их структуры.

Основными единицами седиментационного анализа являются циклиты и фации. Первые в рафинированном виде отражают особенности процесса седиментации во времени, вторые - в пространстве.

Доминирующей чертой разрезов осадочных толщ является их хорошо выраженное циклическое строение, обусловленное главным образом тремя факторами: климатом, количеством привносимого материала и изменениями относительного уровня моря [5]. Последний представляет собой суммарный эффект эвстатических колебаний уровня Мирового океана и темпа погружения или воздымания дна морского бассейна. При этом в формировании «прибрежных» и «морских» циклитов основную роль играет эвстатический фактор, вызывающий миграцию фаций в бассейне седиментации и обеспечивающий чередование типов пород в разрезе. В то же время, эвстатические флуктуации являлись во многом определяющими для осадконакопления и в континентальных средах, поскольку именно с ними связаны изменения базиса эрозии, уровня грунтовых вод и т.д.

Разномасштабные колебания относительного уровня моря, вызванные как эвстатическими, так и тектоническими причинами, определяют формирование в составе осадочных толщ ассоциаций иерархически соподчиненных циклитов. Границами этих циклитов, как правило, выступают поверхности субэвральные несогласий, фиксирующие разноуровневые падения относительного уровня моря, и коррелятивные им согласные поверхности. Причем, степень выраженности, площади распространения несогласий и длительность сопутствующих им перерывов увеличиваются с ростом ранга цикличности. В такой трактовке выделяемые циклиты близки к секвенциям, что позволяет, используя концептуальную базу секвенсстратиграфического метода, дифференцировать их на более мелкие элементы - фациальные последовательности (седиментационные системы), отражающие различное положение и фазы движения относительного уровня моря. «Полный» циклит состоит из трех седиментационных систем: низкого стояния (или нижней - НСС), трансгрессивной (ТСС) и высокого стояния (или верхней - ВСС). Первая формируется в фазу падения и начала подъема уровня моря, когда значительные области шельфа осушаются и подвергаются субэвальной эрозии, а осадконакопление осуществляется главным образом за кромкой шельфа в его наиболее мористой части или на локальных участках суши. В фазу интенсивного подъема уровня моря, охватывающую период от начала до максимального затопления шельфа, накапливаются осадки ТСС. Образование ВСС отвечает фазам стабилизации и падения уровня моря; оно начинается с момента максимального затопления шельфа и заканчивается новым осушением его поверхности. В зависимости от вариаций темпов изменения относительного уровня моря реальные цик-

литы могут быть трех- (НСС+ТСС+ВСС), двух- (ТСС+ВСС) и одноэлементными (ВСС). Основой строения седиментационных систем ординарных циклитов являются серии элементарных циклитов (ЭЦЛ), ограниченных практически синхронными трансгрессивными поверхностями.

Седиментационные системы разноранговых циклитов слагают циклиты “подчиненных” рангов: ординарные – состоят из элементарных, представляя собой, в свою очередь, “кирпичики” седиментационных систем мезоциклитов и т.д. Последовательная смена циклитов более низкого ранга в той или иной седиментационной системе циклита более высокого ранга определяется направленностью развития бассейна седиментации. Так, ТСС формируют комплексы ретроградирующих или наступающих на сушу морских и прибрежно-морских осадков, оформленные в виде “углубляющихся” (ретроградационных) циклитов соответствующего ранга. ВСС свойственны комплексы аградирующих и проградирующих осадков, отвечающих регрессии моря, ассоциации которых образуют “наращивающиеся” (аградационные) или “обмеляющиеся” (проградационные) циклиты. Граница между трансгрессивной и верхней седиментационными системами проводится по подошве “самого трансгрессивного” пласта (поверхности максимального затопления), которому в наиболее мористой части бассейна седиментации отвечают конденсированные отложения.

Следует отметить, что установление цикличности развития бассейна седиментации или его участка носит не столько научно-исследовательскую, сколько утилитарную направленность, поскольку установленные закономерности смены фаций в разрезе позволяют адекватно отображать их в смещении фациальных зон, а значит, и локализовать в пространстве и времени области максимального накопления осадков, способных аккумулировать углеводородный флюид.

Выявление специфики строения циклитов и создание циклофациальной модели осадочных толщ базируется на фациальном анализе, позволяющем на основе литогенетических исследований восстанавливать палеогеографическую зональность в бассейне седиментации и тем самым прогнозировать распространение разновозрастных циклитов, отличающихся литологическим наполнением их седиментационных систем.

Фациальная диагностика пород проводится на основе целенаправленной генетической интерпретации результатов петрографических и петрофизических исследований керна, анализа формы кривых электрического и радиоактивного каротажа. При этом реконструкция фаций основывается на трех главнейших методических приемах. Первый из них заключается в анализе парагенетических ассоциаций литотипов и базируется на известном законе Головкинского-Иностранцева-Вальтера, согласно которому последовательность наложения полифациальных осадков в разрезе отражает закономерности их распределения по латерали. Это означает, что залегать друг на друге могут лишь те фации, которые образовались рядом, поэтому всегда с известной долей вероятности можно восстановить генезис того или иного типа отложений, зная происхождение его ближайших соседей. Второй - это метод «исключения», позволяющий из нескольких вариантов возможного

генезиса отложений, обладающих сходными первичными признаками, исключить наименее вероятные для данной палеогеографической обстановки. Третий методический прием, основывающийся на законах аккомодации, включает диагностику генезиса осадочных тел вкупе с анализом как толщин самих тел, так и перекрывающих их толщ. Так, например, осадки, имеющие «глубоководный» облик и (или) содержащие «глубоководную» фауну, могут быть диагностированы как глубоководные образования только в том случае, если их толщины отвечают соответствующей глубине бассейна седиментации (при компенсационном развитии), либо (при недокомпенсации) их перекрывают осадочные образования, способные заполнить создавшееся аккомодационное пространство.

Найденные закономерности в распределении литотипов в разрезе скважин, охарактеризованных керновым материалом, используются для прогноза фаций в тех частях разреза, где керн отсутствует, и имеются лишь данные каротажа. Разработка моделей каротажных фаций становится возможной благодаря тому, что практически каждой фации свойственен специфический вещественный состав (например, наличие глинистой примеси и «форма» ее присутствия – слоистая или рассеянная), текстурные параметры, особенности строения пустотного пространства [1,3,4].

Анализ распространения элементарных циклитов и их ассоциаций по разрезу дает основание для корреляции синхронных, но накапливавшихся в различных условиях, отложений, поскольку характер последовательности наслоения осадков (про- или ретроградационный) будет одинаковым для разных разрезов, несмотря на то, что они представлены различными по генезису отложениями.

Однако все эти построения и реконструкции отвечают главным образом разрезам скважин. Чтобы осуществить прогноз фаций в межскважинном пространстве необходимо проведение структурно-тектонического и сейсмостратиграфического анализов, направленных на реконструкцию рельефа дна седиментационного бассейна или его участка, выявление морфологии и структуры осадочных тел (разноранговых циклитов), определение типов разделяющих их несогласий.

В качестве примера рассмотрим седиментационные модели нескольких объектов, разработанные на основе применения изложенных методических приемов.

В разрезе неокома Западной Сибири выделяется ассоциация иерархически соподчиненных циклитов, формирование которых обусловлено совместным действием локальной тектоники и эвстатических колебаний уровня моря. В генерализованном виде каждый из них представляет собой клиноформенный комплекс, состоящий из ундо-, клино- и фондотемных элементов. Так называемые шельфовые пласты, образующие ундоформенную часть соответствующего комплекса, и их более глубоководные аналоги (глинистые отложения клинотемы и глинисто-битуминозные – фондотемы) отвечают ординарным циклитам или секвенциям IV-V порядка.

Шельфовый пласт БУп.

Синтез информации, полученной в результате макро- и микроскопических исследований керна и анализа каротажных диаграмм, позволил диагностировать в составе пласта БУ_n несколько осадочных комплексов, различающихся композициями парагенетических ассоциаций литотипов: забарьерной лагуны, песчаных баров пляжа и предпляжья, переходной зоны и шельфа (рис. 2).

В основании пласта БУ_n развит прослой, представленный однородными темноокрашенными (до черных) хорошо отмученными аргиллитами с маломощными линзами и слойками алевролитов (рис. 2а). Их состав и текстурные особенности отражают в целом спокойные субаквальные обстановки осадконакопления, различаясь лишь по интенсивности поступления терригенного материала, и отвечают наиболее глубоководным для рассматриваемого участка бассейна седиментации шельфовым фациям. Вверх по

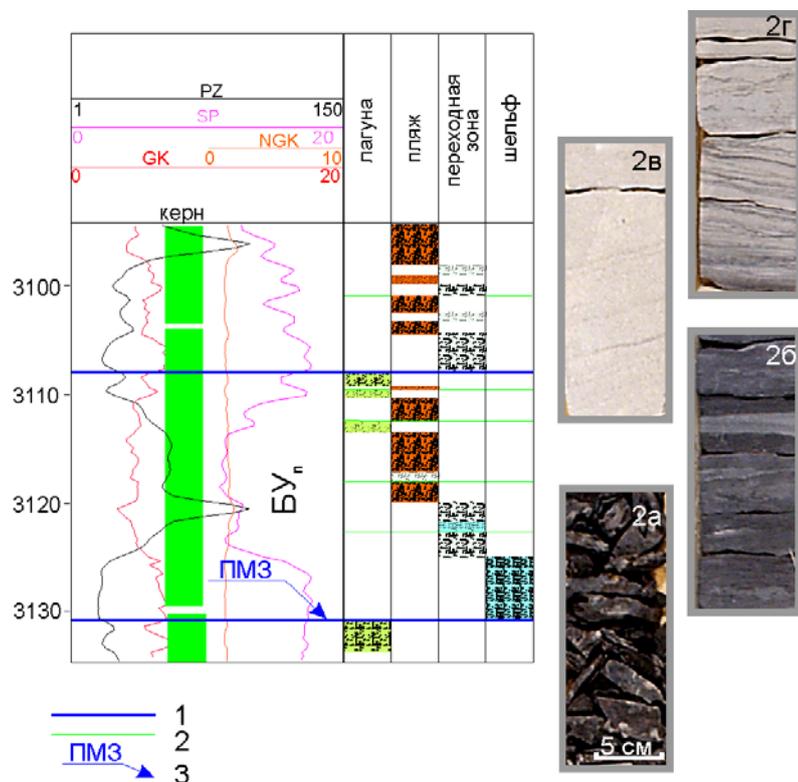


Рис. 2. Фациальная диагностика отложений пласта БУ_n.
1-границы пласта, 2-границы элементарных циклитов,
3-поверхность максимального затопления

Вверх по разрезу пласта происходит последовательное уменьшение алевропелитовой примеси и увеличение песчаной до перехода алевролитов в песчаники. Песчаники серые и светло-серые аркозовые (кварц-полевошпатовые) слюдистые с глинисто-карбонатным цементом, средне-мелкозернистые массивные или косослоистые (рис. 2в). Тектурные и структурные особенности песчаников, особенности вертикального и латерального развития позволяют предположить, что они накапливались в пределах нижнего пляжа и верхней предпляжевой зоны.

В верхней части пласта в составе пород преобладают пелитовые разности, но они резко отличаются от таковых основания пласта (рис. 2г): осадки менее глинистые, полосчатые, четко выражено слойчатые (преобладает горизонтальная и линзовидно-волнистая слойчатость), обогащен-

ци шельфовым фациям. Вверх по разрезу их сменяют отложения переходной зоны и нижней предпляжевой зоны, которым свойственны преимущественно глинисто-алевритовый состав, серые цвета, отчетливо горизонтальные и линзовиднослоистые текстуры; последние придают породе неявный нодулярный облик (рис. 2б); иногда в керне фиксируются следы оползаний осадка и его перемешивания под действием подводных течений. Вверх по разрезу пласта происходит последовательное уменьшение алевропелитовой примеси и увеличение песчаной до перехода алевролитов в песчаники. Песчаники серые и светло-серые аркозовые (кварц-

ные углистой органикой, иногда со следами жизнедеятельности донных организмов. В целом, осадки имеют преимущественно субаквальный генезис, и их аккумуляция, по-видимому, происходила в условиях забарьерных лагун (возможно, приливно-отливных равнин) с низкой гидродинамикой водной среды.

Таким образом, в строении пласта $БУ_n$ зашифровано типичное для всех шельфовых пластов неокома Западной Сибири изменение ОУМ: максимально высокое его стояние в начале седиментационного цикла и последующее генерализованное падение. Такая цикличность процессов осадконакопления обеспечивает благоприятные условия для формирования природных резервуаров, способных содержать скопления углеводородов.

Анализ долевого участия «индекс»-литотипов в строении реальных разрезов, а также результаты палеогеоморфологического и сейсмофациального анализов позволили разработать карту-схему фациального районирования изучаемого участка для пласта $БУ_n$ (рис. 3), на которой выделяются три района. В разрезах скважин северо-западного района доля наиболее глубоководных для рассматриваемого седиментационного цикла алевро-пелитовых отложений нижней предпляжевой зоны самая значительная.

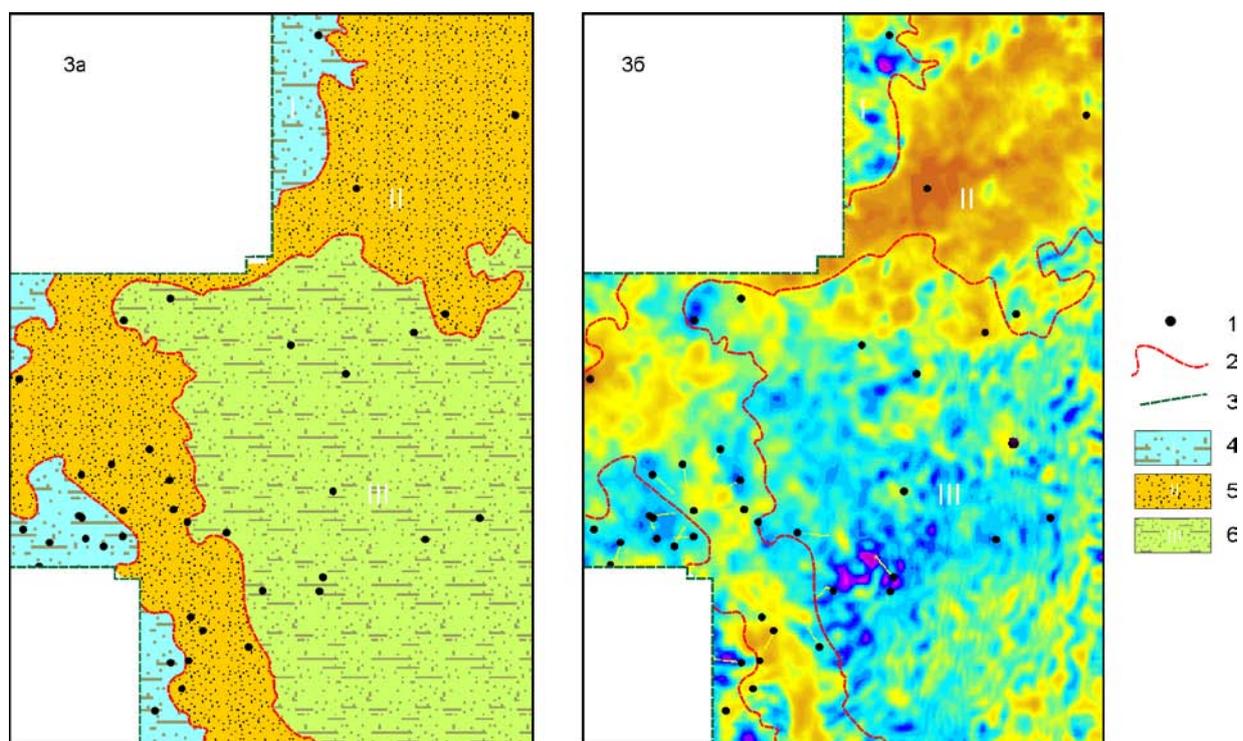


Рис. 3. Схема фациального районирования пласта $БУ_n$ (3а) и карта псевдоакустических импедансов (3б). местоположение изученных скважин; 2 - границы литолого-фациальных зон; 3- границы куба 3D; зоны преобладающего развития отложений: 4-предпляжевого комплекса, 5-барового комплекса, 6-забарьерной лагуны.

Прослой проницаемых песчаников встречаются здесь преимущественно в верхней части пласта, маркируя окончание седиментационного цикла и смещение фациальных зон, вызванное заполнением аккомодационного пространства.

Наибольшие толщины песчаные тела имеют в северо-восточной и западной частях рассматриваемого района – в зоне наиболее длительного и стабильного существования условий для аккумуляции песчаного материала. Эти зоны хорошо картируются по карте сейсмических атрибутов, локализуясь в областях пониженных значений (Зб), и объединяют систему песчаных аккумулятивных форм пляжа и верхней предпляжевой зоны: островов, отмелей и разделяющих их приливных протоков, приливно-отливных дельт.

В центральной и юго-восточной части предполагается существование забарьерной лагуны, в которой субаквальные условия осадконакопления существовали достаточно длительное время (практически всю вторую половину седиментационного цикла). Низкая гидродинамика водной среды предопределяла существенно глинистый и алевритистый состав осаждавшегося материала.

Накопление песчаных осадков здесь лимитировалось зоной лагунного пляжа, либо было связано с выдвиганием проксимальных частей барового комплекса в сторону берега при частных повышениях относительного уровня моря (элементарная цикличность).

Ачимовские отложения.

Несомненно, основной объем песчаного материала в морском бассейне накапливается в его прибрежной зоне. Однако при создании необходимых условий песчаные тела могут располагаться и в фондоформенной части клиноциклита (так называемые ачимовские отложения). Совместная стратификация разрезов глубоких скважин, анализ положения песчаных линз в структуре клиноциклитов, а также особенностей распространения песчаных пластов и линз во времени и пространстве совместно с палеореконструкциями и горизонтальными срезами кубов амплитуд позволяют предполагать, что накопление песков в глубоководной впадине происходило вероятнее всего в моменты максимальных падений ОУМ, когда на большей части шельфа осадконакопление не осуществлялось (или осуществлялось в незначительном объеме в условиях крайне мелководных супралиторальных и/или лагунных зон). Низкое положение базиса эрозии способствовало образованию каналов и протоков, по которым обломочный материал транзитом проносился в глубоководную впадину, формируя различные по размерам и конфигурации конусы выноса. При этом эти каналы и протоки, отчетливо проявляющиеся в волновом поле, могли эродировать отложения не только соответствующего пласта, но и более древние. В этом случае, области эрозии лимитированы руслом канала. Песчаные пласты перекрыты глинистыми пачками различной толщины (как правило, 15-20 м), фиксирующими, по-видимому, моменты повышения относительного уровня моря, сопровождавшегося трансгрессией и возобновлением интенсивного накопления осадков на шельфе и в прибрежной зоне. При таком механизме формирования клиноформенных осадочных

комплексов каждый из них содержит два седиментационных маркера, отражающих резкие смены процесса осадконакопления. Это поверхности размыва с субэдральными признаками и «максимально трансгрессивные» пласты, соответствующие поверхности максимального затопления. Первые, как правило, практически не проявляются в волновом поле, вторые, наоборот, образуют устойчивые отражения, которые и отождествляют с соответствующими отражающими горизонтами (ОГ). В то же время в характере изменения волнового поля и специфике пространственного со-

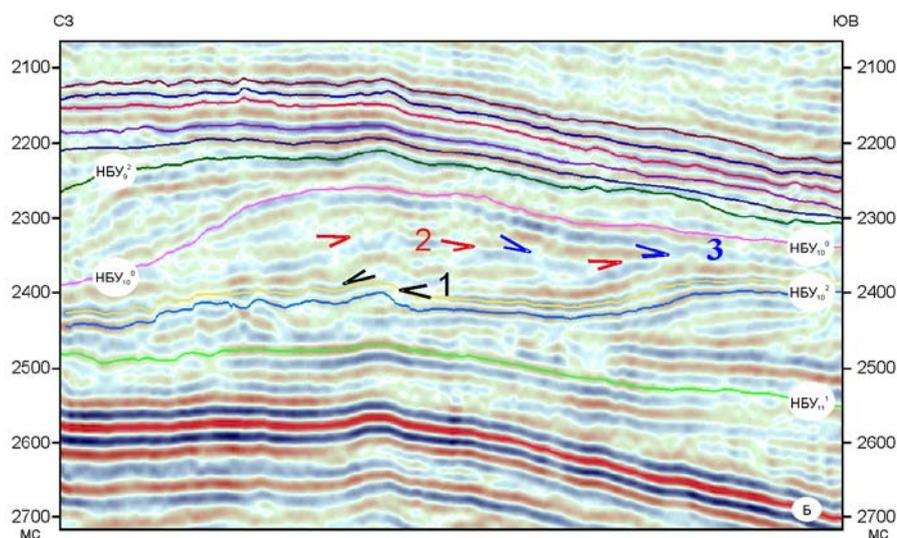


Рис. 4. Фрагмент сейсмического временного разреза в интервале клиноформного комплекса между отражающими горизонтами НБУ₁₀⁰ и НБУ₁₀². Стрелками показаны различные типы несогласий: 1- подошвенное прилегание, 2- утыкание, 3 – подошвенное налегание.

отношения осей синфазности заложена информация о том, как заполнялась глубоководная впадина и какой характер смещения имела береговая линия (про- или ретроградационный). Так, на рис. 4 показан один из вариантов интерпретации временного разреза клиноформного комплекса.

Для осей синфазности этого интервала не характерны протяженность и устойчивая амплитудная характеристика. Именно поэтому при корреляции

отражающих горизонтов здесь обычно возникают большие трудности. Такая изменчивость связана с изменением физических (акустических) свойств пластов, которые, в свою очередь, контролируются литологическим фактором. Переход от шельфовых существенно песчаных отложений к глинистым склоновым сопровождается изменением акустической жесткости пород.

В таких условиях основным источником информации о строении и истории развития разреза является взаимоотношение осей синфазности. На рисунке 4 отчетливо видно как отдельные фазы отражений формируют классические типы несогласий: подошвенное прилегание (1), кровельное утыкание (2) и подошвенное налегание (3) соответственно в нижней, средней и верхней частях клиноформного комплекса между отражающими горизонтами НБУ₁₀⁰ и НБУ₁₀². Механизм образования подобной картины можно объяснить следующим образом (рис. 5). Временной интервал, заключенный между ОГ НБУ₁₀⁰ и НБУ₁₀², представляет собой осадочный клиноформный комплекс, ограниченный трансгрессивными поверхностями (точнее, поверхностями максимального затопления), внутри которого поведение осей синфазности отвечает про- (соответственно 1,2,3) и ретроградационной (4 и 5) направленности развития бассейна седиментации. Первые из них

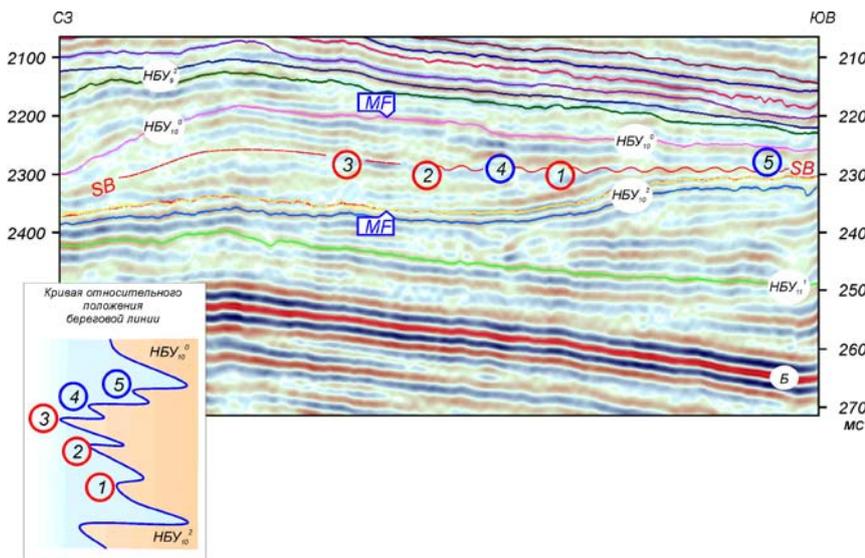


Рис. 5. Вариант интерпретации временного разреза. 1-5 – трансгрессивные поверхности, совпадающие с границами секвенций IV-V порядка; SB-граница секвенции III порядка; MF-поверхность максимального затопления.

низкого стояния ОУМ. В рассмотренном случае – это момент, соответствующий 3 циклу. Поэтому именно в этом стратиграфическом интервале следует ожидать появления значительных по размерам песчаных конусов выноса у подножия склона. Менее масштабные падения ОУМ (например, 1 или 2) отвечают за локальное «опесчанивание» разреза, либо образование небольших песчаных тел.

По результатам анализа динамики волнового поля над ОГ НСУ₁₀² (цикл 3) достаточно уверенно выделяется зона пониженных амплитуд, отождествляемая нами с присутствием относительно пористых песчаников. Морфология и положение ее по отношению к склону глубоководной впадины позволяют отождествить эту с зону с конусом выноса (рис. 6).

Аналогичный песчаный конус выноса был обнаружен в другом исследуемом объекте (рис. 7). Здесь песчаники лопастей конуса выноса представлены серыми средне-мелкозернистыми разностями, в различной степени алевритистыми и глинистыми, с редкими хорошо окатанными обломками аргиллитов, с глинистым и глинисто-карбонатным цементом. Они относятся к группе граувакковых аркоз. Для песчаников характерна горизонтальная,

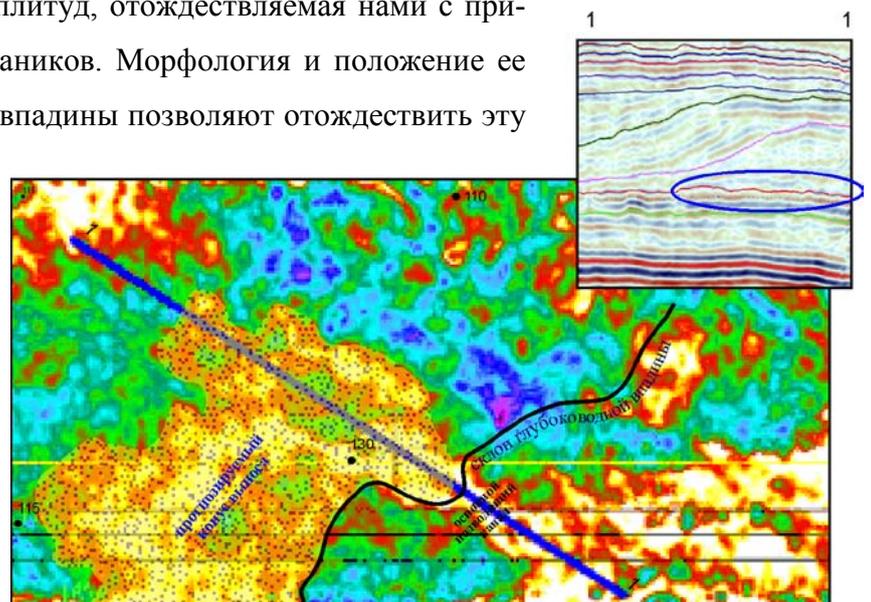


Рис. 6. Вариант геологической интерпретации результатов атрибутного анализа.

отображают последовательное обмеление и смещение береговой линии в сторону моря в условиях регрессии, а вторые, напротив, наступление моря на сушу, вызванное повышением ОУМ. Каждый из них соответственно отвечает седиментационному циклиту более мелкого ранга.

Как уже отмечалось, накопление песчаных осадков в глубоководном бассейне происходит в моменты максимально

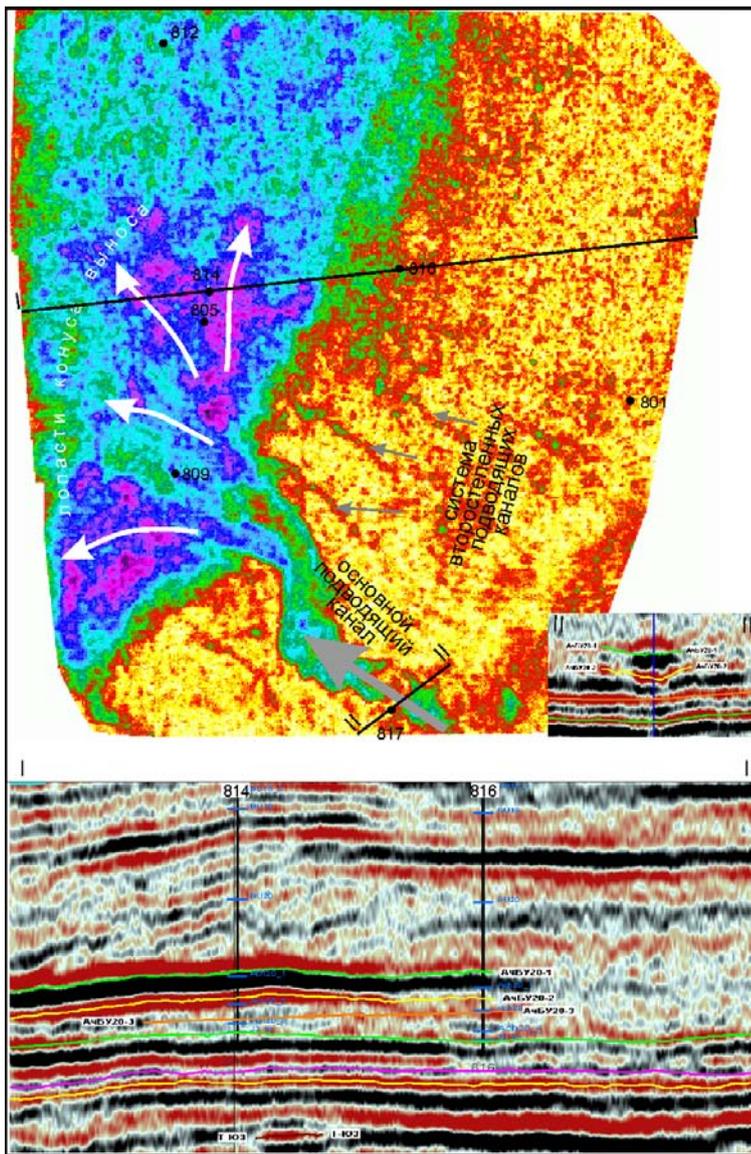


Рис. 7. Отображение в волновом поле элементов конуса выноса.

ГИС, в результате строятся кривые пористости, выделяются проницаемые пласты и обосновывается их корреляция с учетом положения внутри седиментационных циклитов.

Несомненно, что для выявления особенностей распространения проницаемых пластов по площади и прогноза их ФЕС в межскважинном пространстве, необходимо использовать количественные параметры волнового поля. При этом целесообразно оперировать такими параметрами емкости, как суммарная мощность проницаемых пропластков; “линейные запасы”- коэффициент mh , представляющий собой сумму произведений средней пористости на мощность проницаемых пропластков с учетом граничного значения пористости; коэффициент удельной емкости пласта (E), рассчитываемый как частное сумм mh в составе продуктивного пласта к его общей мощности, см/м.

Построение карт прогнозных параметров осуществляется с применением геостатистического подхода. Эта методика основана на выявлении статистической зависимости между коллекторскими свойствами целевых интервалов и сейсмическими атрибутами. Под сейсмическими атрибу-

волнистая и косо-волнистая слоистость, подчеркнутая тонкими (до 1 мм) слойками аргиллита и намывами углистого детрита, иногда слоистость нарушена оползанием осадка. Алевролиты и аргиллиты, встречающиеся в разрезе ачимовских тел, представляют собой, вероятно, межлопастные образования, мигрировавшие по площади в процессе развития конуса выноса.

Сверху и снизу алевро-песчаное тело конуса выноса ограничено глинистыми пачками, и характера насыщения в разрезах скважин, не охарактеризованных керновым материалом.

С учетом всего имеющегося скважинного материала (кern, данные геофизических и промыслово-геофизических исследований скважин), кластеризованного по генетическим признакам в соответствии с принятыми геофизическими характеристиками, осуществляется количественная оценка

тами здесь понимается не только стандартный набор динамических параметров волновой картины, но также результаты псевдоакустической (или псевдоупругой) инверсии, AVO-атрибуты, карты временных толщин между горизонтами и т.д. Выбор окон для расчета динамических атрибутов выполняется на основе сейсмической привязки и сейсмо-геологического моделирования, основанного на петрофизических зависимостях упругих и емкостных параметров. Для расчета карт параметров емкости обычно применяются методы статистической интерполяции (Colocated Cokriging, Kriging with External Drift). При правильно построенных регрессионной модели и модели пространственной корреляции, эти методы позволяют оптимальным образом настроить весовые коэффициенты сейсмических и скважинных данных, участвующих в вычислении прогнозных параметров.

В описываемой методике уделяется пристальное внимание к настройке регрессионной модели. На этапе выбора опорных сейсмических атрибутов производится статистический анализ, в процессе которого происходит перебор большого количества многомерных корреляционных зависимостей. Окончательный выбор регрессионной модели осуществляется на основе совместного рассмотрения нескольких статистических показателей:

- величины коэффициента множественной (выборочной) корреляции;
- оценки погрешности определения коэффициента корреляции при заданном числе степеней свободы выборки и полученной оценки коэффициента корреляции;
- значения F-теста и соответствующего ему значения уровня значимости;
- относительного уровня случайной составляющей (величине «эффекта самородка») в опорном атрибуте (рассчитанном по полученному уравнению регрессии).

Такой подход позволяет получить оптимальное соотношение между величиной оценки погрешности прогноза в межскважинном пространстве (определяемой значением выборочного коэффициента корреляции) и надежностью регрессионной модели [2].

В процессе такого анализа в качестве контроля используется геологическая информация, полученная на предыдущих этапах: рассчитанный опорный атрибут не должен противоречить выявленным закономерностям распределения на рассматриваемой площади генетически разнородных осадков. Иногда при этом удается разбить выборку на отдельные кластеры, отвечающие разным фациальным зонам. Часто оказывается, что независимый прогноз внутри каждой из зон с последующей их сшивкой дает более качественный результат, чем при анализе всей выборки одновременно.

Так, для продуктивного пласта ST₂ одного из месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции довольно слабая статистическая зависимость удельной емкости с псевдоакустическим импедансом может быть значительно улучшена после разбиения на кластеры, отве-

чающие разным фаціальным зонам (рис. 8). Отметим, что в данном случае фаціальное районирование пласта проводилось только по скважинам и результатам палеоструктурных построений. Для каждого кластера были рассчитаны соответствующие зависимости, с помощью которых построена прогнозная карта параметра Е (рис. 9). Использование этой карты позволило, в свою очередь, значительно детализировать карту фаціальной зональности для рассматриваемого седиментационного цикла (см. рис. 8). При этом адекватность предложенной седиментационно-емкостной модели

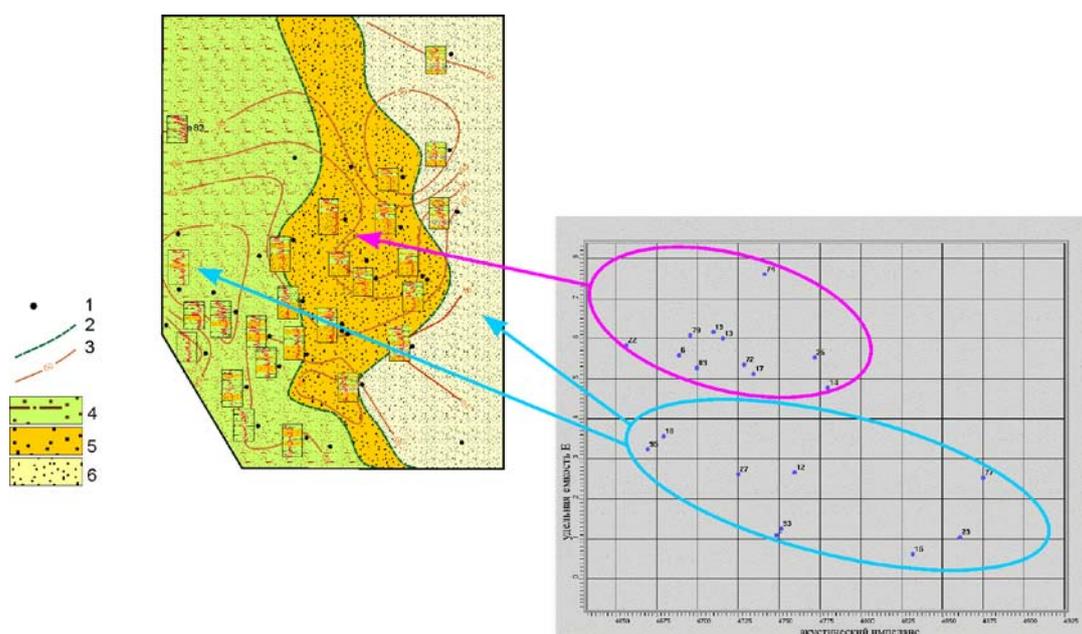


Рис. 8. Корреляционная диаграмма удельной емкости и псевдоакустического импеданса. 1- местоположение изученных скважин; 2- границы литолого-фаціальных зон; 3-изопахиты, м; зоны преобладающего развития отложений: 4- забарьерных лагун и приливно-отливных равнин, 5- нижнего пляжа и верхней предпляжевой зоны, 6 - нижней предпляжевой зоны.

геологическим реалиям подтверждена распределением условных дебитов из изучаемой части продуктивного разреза.

Второй пример, иллюстрирующий применение предлагаемого подхода к прогнозу емкостных свойств пород – пласт БУп, седиментационная модель которого рассмотрена ранее. Здесь в качестве основного параметра емкости использовались значения суммарных эффективных толщин коллектора. Опорным сейсмическим атрибутом для прогноза эффективных толщин по данному пласту являлась карта псевдоакустического импеданса. Выборочный коэффициент корреляции составил 0.85, ожидаемая погрешность вдали от скважин – 1.32 м (стандартное отклонение эффективных толщин коллекторов по скважинным данным - 3 м). При этом количество скважин на данной площади позволяло использовать регрессию с большим числом сейсмических атрибутов, однако анализ перечисленных выше статистических критериев показал, что это привело бы к снижению надежности.

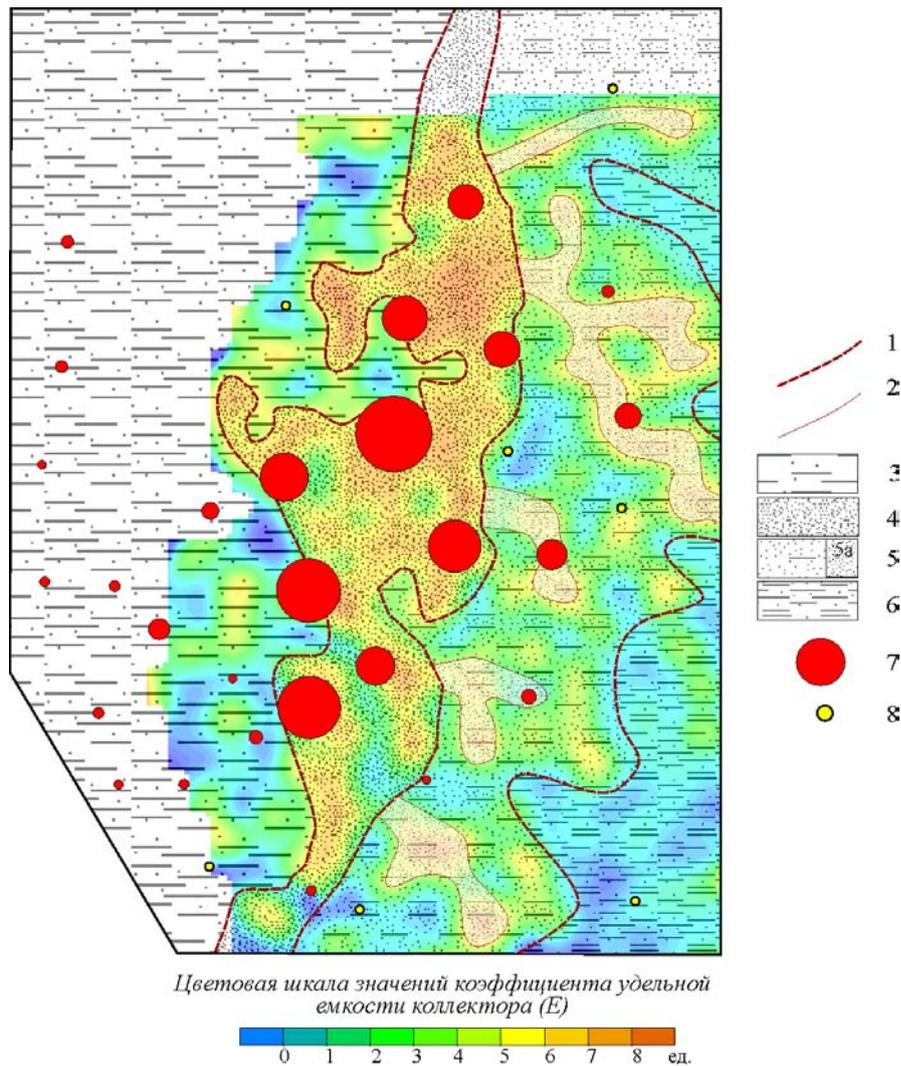
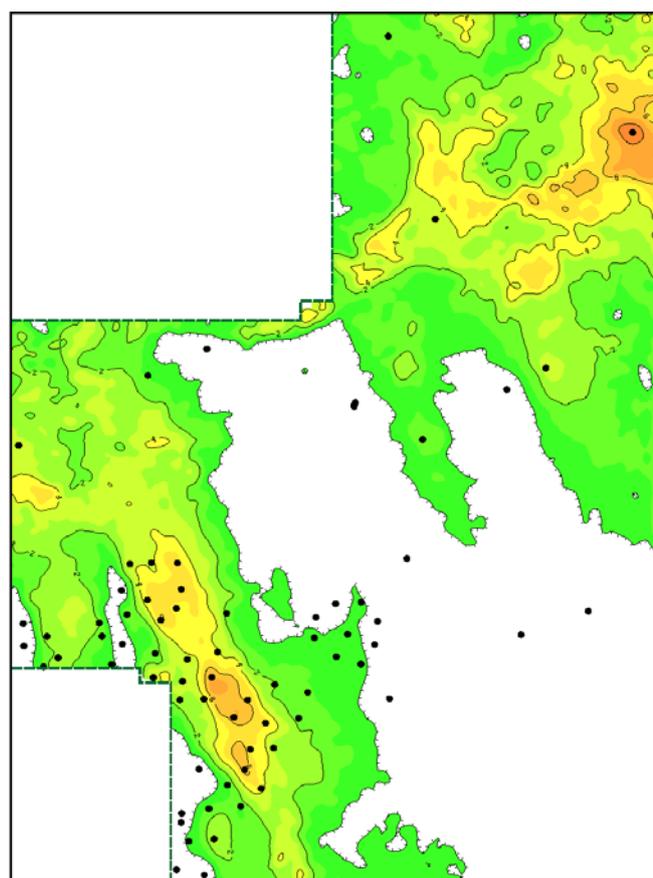


Рис. 9. Прогнозная карта коэффициента удельной емкости коллекторов для пласта ST_2 , совмещенная с картой фациальной зональности.

1- границы фациальных зон; 2- границы локальных песчаных тел; зоны преобладающего развития отложений: 3- забарьерных лагун и приливно-отливных равнин, 4- нижнего пляжа и верхней предпляжевой зоны, 5- нижней предпляжевой зоны с локально развитыми песчаными телами (5а), 6-переходной от предпляжевой к шельфовой; 7 – условные дебиты газа из пласта ST_2 (диаметр круга пропорционален дебиту); 8- притока не получено.

Это связано с ограниченным объемом выборки и наличием шума в сейсмических данных. Повышение выборочного коэффициента корреляции при увеличении размерности регрессии в данном случае сопровождалось увеличением величины «эффекта самородка». Другими словами, получаемые карты прогнозных параметров характеризовались бы большими погрешностями из-за наличия в них помех высокого уровня. Это хорошо видно из следующей таблицы:

Размерность регрессии	Коэф. корреляции	Оценка погрешности аппроксимации эффективных толщин, м	Относительная погрешность аппроксимации эффективных толщин	Величина «эффекта самородка»	Оценка погрешности аппроксимации с учетом «эффекта самородка», м
1	0.85	1.5	0.51	0.07	1.69
2	0.91	1.1	0.37	0.21	1.74
3	0.97	0.8	0.27	0.27	1.73
4	0.98	0.7	0.24	0.3	1.76
5	0.99	0.5	0.17	0.34	1.79
6	0.99	0.3	0.1	0.35	1.77



Цветовая шкала значений эффективных толщин ($H_{эфф}$)

0 1 2 3 4 5 6 7 8 м

- 1 ●
- 2 - - -
- 3 —
- 4 ~~~~~

Помимо статистических критериев, получаемые прогнозные карты контролировались седиментационной моделью. В результате, как и в предыдущем примере, особенности распределения эффективных толщин коллекторов в пласте БУп контролируются главным образом фациальной зональностью (рис. 10).

Рис. 10. Прогнозная карта эффективных толщин коллекторов пласта БУп.

1- местоположение изученных скважин, 2- границы куба 3D, 3 - изолинии эффективных толщин (м), 4- линия замещения коллекторов.

Заключение

Основные достоинства предлагаемой технологии прогноза структуры и свойств природных резервуаров, способных содержать УВ флюид, заключаются в следующем:

- использует общеизвестные («неэксклюзивные») методы исследования природных объектов и широко применяемые комплексы обработки и интерпретации скважинных и сейсмических данных;
- на практике реализует лозунг о необходимости комплексирования геолого-геофизических данных при решении задач моделирования структуры природных объектов;
- позволяет получать автономные результаты на каждом этапе исследований;
- включение в технологическую цепочку результатов многопрофильных исследований снижает степень неопределенности полученной модели;
- позволяет оптимальным образом скомплексировать геологическую и геофизическую информацию;
- показала высокую эффективность при апробации на различных объектах.

Авторы выражают глубокую благодарность организациям, предоставившим возможность публикации материалов, касающихся примеров работ на реальных геологических объектах.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Александр Петрович Жуков – директор ООО «Геофизические системы данных», доктор технических наук.

Валентина Алексеевна Жемчугова – главный геолог ООО «Геофизические системы данных», доктор геол.-мин.наук, профессор.

Кирилл Александрович Эпов – заведующий отделом интерпретации ООО «Геофизические системы данных».

Сергей Леонидович Федотов – менеджер проекта компании Fugro-Jason.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Буш Д.А. Стратиграфические ловушки в песчаниках. Методика исследований. М.: Мир, 1977. 276 с.
2. Использование геостатистического анализа при прогнозировании свойств слабоконтрастных пластов по данным сейсморазведки 3Д /Эпов К.А., Малышева Е.О., Чертенков М.В., Хабаров А.Б.//«Технологии сейсморазведки-II», 2003. Стр. 62-69.
3. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел - литологических ловушек нефти и газа. Л.: Недра, 1984. 260с.
4. Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. М.: Недра, 1989. 294с
5. Kendall C.G., Schlager W. Carbonates and relative changes in sea level //Marine Geol., 23, 1980. P. 181-212.
6. Mitchum R.M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 1: Glossary of terms used in seismic stratigraphy // Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration - Tulsa, Oklahoma: AAPG, 1977. - Memour 26., p.205-212.
7. Van Wagoner J.C., Mitchum R.M., Campion K.M., Rahmanian V.D. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high resolution correlation of time and facies // AAPG Methods in exploration Series. - Tulsa, Oklahoma, 1990. 55p.