

Моделирование при обработке и интерпретации геолого-геофизических данных, в том числе волновых полей в сейсморазведке, — неотъемлемая часть геолого-разведочного цикла работ. О том, с какими трудностями и особенностями имеют дело компании, решая этот вопрос, OGJRussia рассказали ведущие эксперты отрасли.



## С какими трудностями сталкиваются компании при моделировании волновых полей в сейсморазведке?



**Дмитрий Ушаков,**  
ведущий геофизик,  
Weatherford

Моделирование волнового поля в сейсморазведке — вопрос очень широкий и фундаментальный. Принципиально процесс моделирования поля можно разделить на несколько частей:

- постановка задачи и построение модели среды;
- выбор методики моделирования;
- непосредственный расчет.

Естественно, трудности встречаются на каждом из этапов и носят различный характер — от чисто технических ограничений по вычислительным мощностям и до математических ограничений (краевые зоны модели, дискретизация и так далее). При этом важно понимать, что в основе всего процесса лежит непосредственно модель свойств и при ее некорректном построении ошибки будут накапливаться при дальнейшей работе.

Построение адекватной модели является одной из важнейших задач, и именно с этим этапом связаны основные трудности. Построение модели — это всегда некое упрощение реальной среды, проводя которое, нужно оставить лишь ту необходимую информацию, которая нужна для решения конкретной задачи, убрав все лишнее. Зачастую провести корректно эту грань сложно — и получается слишком упрощенная или же, наоборот, перегруженная лишней информацией модель.

Помимо этого, часто имеет место недостаток исходной информации, что не позволяет корректно построить модель. Наиболее ярким примером является полноволновая инверсия (FWI), — по сути, ее алгоритм основан на итеративном уточнении скоростной модели по средствам моделирования волнового поля. При этом остро встают вопросы, откуда брать корректные импульсы и как восстанавливать низкие частоты. Также возникают проблемы с моде-

лированием волнового поля при подавлении кратных волн на суше, поверхностных волн и так далее. Часть проблем можно решить путем модернизации методики съемки (например, используя уплотнение), но ряд проблем можно обойти только благодаря правильному подбору начальной модели.



**Игорь Милетенко,**  
вице-президент по  
взаимодействию с  
государственными  
органами,  
ПАО «ГЕОТЕК  
Сейсморазведка»,  
генеральный директор,  
ООО «ГеоПрайм»

Моделирование волновых полей в нефтегазовой сейсморазведке, как основного метода изучения перспективных объектов используется на двух этапах.

Первый этап — проектирование сейсморазведочных работ 2D и 3D с целью определения системных параметров методики проведения полевых исследований. Как правило, на данном этапе используются кинематические или лучевые методы моделирования волновых полей. При этом, на наш взгляд, особых трудностей не возникает и существующие методики и программные средства моделирования волновых полей наряду со средствами планирования систем наблюдений успешно решают задачу проектирования.

Второй этап — обработка данных 2D и 3D сейсморазведки и использование моделирования как инструмента контроля эффективности решения обратной задачи, то есть схожимости первичных экспериментальных данных (сейсмограмм / сейсмических разрезов)



**Арсен Сулейманов,**  
к.т.н., заведующий  
отделом глубоких  
геофизических  
исследований,  
Московский филиал  
ФГБУ «ВСЕГЕИ»

по своим кинематическим и динамическим характеристикам с аналогичными модельными волновыми полями. Трудности моделирования связаны со сложнопостроенностью геологической среды, неоднородным характером слагающих объектов и наличием анизотропии и ее пространственным характером.

Современная сейсморазведка для исследования неоднородных и анизотропных сред развивается в направлении использования различных типов волн (многоволновая сейсморазведка), для чего осуществляются съемки 2D, 3D – 3C наблюдений. Соответственно, обработка и интерпретация ведется с использованием полевых данных как продольных, так и поперечных волн. Отсюда следует необходимость разработки методов решения прямых задач на основе моделирования полноволновых составляющих сейсмического поля. Однако такое моделирование на сегодня возможно в предположении однородности среды и в некоторых частных случаях анизотропных сред.

В связи с этим геофизики-исследователи сталкиваются с трудностями полноволнового моделирования для сред с произвольным распределением упругих и поглощающих параметров.

Расчет сейсмических полей приходится осуществлять путем перебора различных упрощенных моделей, учитывающих отдельные особенности изучаемого объекта, например строго ориентированная трещиноватость может быть рассмотрена как анизотропия определенного типа.

Таким образом, сложности моделирования заключаются в сложностях строения реальных геологических сред.



**Роман Копенкин,**  
менеджер по  
сейсморазведке,  
ООО «Индженик  
Груп»

На сегодняшний день моделирование сейсмического волнового поля является крайне важной задачей, в особенности в условиях сложных геологических разрезов, в районах, где развита соляно-купольная и взбросо-надвиговая тектоника.

В первую очередь моделирование направлено на верификацию гипотез того или иного строения геологической среды, и при сопоставлении наблюдаемых и модельных сейсмических данных выбирается наиболее адекватный вариант. Крупнейшие мировые нефтегазовые и сервисные компании ведут собственные разработки программного обеспечения в этом направлении.

В нашей стране основную долю добываемой нефти обеспечивает Западная Сибирь, недра кото-

рой, с точки зрения обработки, являются не такой сложной средой. И главная проблема, на мой взгляд, заключается в том, что в подавляющем большинстве проектов сейсмическое моделирование, даже в упрощенном варианте, не выполняется в принципе.

Иногда при атрибутом анализе сложно дать физическое обоснование найденным корреляционным зависимостям между петрофизическими свойствами и сейсмическими атрибутами, соответственно, прогнозы, сделанные на основе таких связей, выглядят неправдоподобно. А ведь именно с помощью сейсмического моделирования можно решать задачи, направленные на оценку и обоснование взаимосвязи между динамическими характеристиками сейсмической записи (амплитудами, частотами) и петрофизическими свойствами изучаемых отложений (пористостью, эффективной толщиной, насыщением).

В упрощенном виде сейсмическое моделирование сводится к созданию набора синтетических трасс (сейсмограмм) для различных моделируемых сценариев, которые выбираются на основе анализа петрофизических данных по имеющимся скважинам и данных региональной геологии. Создаются типичные модели, описывающие контрастные вариации петрофизических характеристик изучаемых отложений.

Сложности, с которыми сталкиваются интерпретаторы при проведении сейсмического моделирования, связаны с отсутствием качественных замеров скоростей продольных и поперечных волн ( $V_p$ ,  $V_s$ ) и плотности, зарегистрированных в широком интервале разреза, перекрывающем целевые объекты.

Нередко каротажные кривые записаны с искажением показаний в интервалах каверн размытого ствола скважины, при этом восстановление истинных значений из других методов ГИС превращается в искусство.

Малое количество или полное отсутствие замеров скоростей поперечных волн в скважинах изучаемых площадей остается существенным ограничением при моделировании сейсмограмм для анализа AVO-эффектов, обусловленных насыщением и/или литологией.

Несмотря на очевидную практическую значимость моделирования для подкрепления сделанных предположений и прогнозов, специалисты нередко избегают использовать сейсмическое моделирование в своих интерпретационных проектах.

В большой степени это обусловлено значительными временными затратами на выполнение этих работ, связанными с подготовкой и анализом скважинных кривых, петрофизических параметров,

необходимых для моделирования. И, принимая во внимание сжатые временные рамки проектов, интерпретаторам не всегда удастся выделить нужные ресурсы на выполнение работ по моделированию, особенно если оно не было предусмотрено техническим заданием.

В завершение стоит отметить, что сейсмическое моделирование хоть и помогает решать различные геологические задачи, но не является единственным и универсальным инструментом. Этап сейсмического моделирования целесообразно включать в работы по динамической интерпретации сейсмических данных в комплексе со всесторонним изучением всей имеющейся геолого-геофизической информации.



**Валентин Колесов,**  
генеральный директор  
ЗАО «Пангея»

Задача сейсмического моделирования – предсказать и/или объяснить волновую картину, наблюдаемую на реальных данных сейсмических наблюдений.

Моделирование волновых полей основывается на модели среды, включающей в реальных условиях более 99% объема, не содержащего нефть и газ, и менее 1% горных пород,

пустотное пространство которых может быть насыщено углеводородами. Поэтому моделирование может быть очень полезно для изучения строения основных структурных элементов разреза (особенно в сложных тектонических зонах, в зонах со сложным строением ВЧР, в зонах, где разрез характеризуется большим количеством акустически контрастных границ), но применение его для прогноза свойств резервуаров весьма ограничено.

Тонкие детали строения разреза – литологические замещения, выклинивания маломощных пластов, малоамплитудные нарушения учесть в модели среды можно, но различных вариантов таких моделей, соответствующих наблюдаемому волновому, может быть очень много, и все они будут эквивалентны – это известная проблема эквивалентности. Эвристичность моделирования волновых полей для прогноза свойств резервуаров очень ограничена.

Другой тип вызовов при волновом моделировании – адекватность используемых уравнений, по которым рассчитывается волновое поле, реальным физическим свойствам среды.

Основные сложности представляет учет рассеяния сейсмических волн, неупругих эффектов в породах, содержащих нефть и газ, обменных волн.



**Сабина Кларнер,**  
технический директор,  
ООО «Кларенко»

В связи с доступностью огромных вычислительных мощностей, в том числе и через облачные решения, за последние годы возможности моделирования сейсмических волновых полей существенно расширились.

На основе прямого моделирования стали реально применимы, например, алгоритмы полноволновой инверсии или подавления волн-спутников на морских данных.

В результате применения таких процедур мы получаем существенное расширение спектра сейсмических данных (в обе стороны) и значительно более детальные скоростные модели, что в разы повышает качество и разрешенность результатов синхронной инверсии. Это облегчает задачи прогноза и картирования литологических особенностей разреза, особенно в случаях ограниченной скважинной информации.

Мы с такими данными работаем, к сожалению, в производственном режиме пока только за пределами России. В России инертность к применению таких мощных процедур пока не преодолевается, возможно, и потому, что они достаточно дорогие. А по наименьшей цене необходимые вычислительные мощности нереализуемы. К сожалению, я вижу сопротивление уже на уровне технических специалистов, до менеджмента, принимающего решения, эти вопросы зачастую даже не доходят. На данный момент существует больше системных, чем вычислительных проблем, и над этим надо работать в первую очередь.

Современные вычислительные мощности и алгоритмы позволяют решать достаточно сложные задачи прямого моделирования волновых полей, но, с точки зрения сейсмика-интерпретатора, наиболее ценными являются алгоритмы решения обратных задач, доведенные до уровня промышленного использования.

Мы еще не до конца используем возможности сейсмической инверсии, основанной на примитивной сверточной модели сейсмической трассы, и здесь основные проблемы лежат не в области моделирования волновых полей, а в области адекватной подготовки начальной модели, то есть в области корректной интеграции скважинных и сейсмических данных. Живой проблемой является моделирование волновых полей в трещиноватых средах, но и здесь основные сложности лежат не столько в области собственно расчета волновых полей, сколько в подготовке обоснованных реальными данными начальных моделей.



## В чем основные особенности моделирования при обработке и интерпретации геолого-геофизических данных?



**Андрей Зайцев,**  
заместитель  
главного геолога  
по геологическому  
моделированию, ООО  
«ИНГЕОСЕРВИС»

В настоящее время под геологическим моделированием чаще всего понимается построение 3D геологической модели, представляющей собой цифровую модель структурных элементов геологического строения, учитывающую особенности пространственного распространения пластов-коллекторов, их емкостных свойств и насыщения. Ставится задача: формализовать наши знания о свойствах изучаемого природного объекта, приблизиться к наиболее адекватному описанию и представлению его свойств и характеристик. Для выполнения такой задачи программное обеспечение должно обладать необходимым и полным набором функционала.

Стоит признать, что моделирование в наиболее полном понимании его специалистами является тяжелой и трудновыполнимой задачей. Второй фактор трудности — это временные рамки, в которые поставлен специалист, решающий задачу построения геологической модели имеющимися программными средствами.

Исходя из этого, глобально можно сформулировать следующие основные трудности.

1. Трудоемкость процесса перевода свойств природного объекта и его характеристик в цифровую пространственную модель вытекает из сложности самого природного объекта и ограниченности наших знаний о нем.

2. Мультидисциплинарность процесса. Как ни странно это звучит, из необходимости наиболее полного решения специальных задач мультидисциплинарность порождает необходимость решения вновь возникающих проблемных задач и вопросов.

3. Ограниченный объем информации, позволяющей наиболее корректно объяснить существующие причинно-следственные связи и статистические закономерности.

4. Невозможность использования для работы измененных петрофизических данных о свойствах объекта разных лабораторий вне зависимости от наличия многочисленных сертификаций.

5. Необходимость использования часто противоречащих друг другу данных из других областей геологии и геофизики.

6. Для сервисных компаний отдельно стоит проблема необходимости соблюдения многочисленных инструктивных и корпоративных требований компаний. Объем и количество таких требований возрастает. Существует большое количество инструкций, методических руководств и требований как федерального уровня, так и каждой компании в отдельности. Несмотря на это, влияние на оценку выполненной работы оказывают субъективные критерии оценки конкретных специалистов и отсутствие самой возможности построения альтернативной модели. Приходится снимать как объективные противоречия, так и субъективные различия в понимании правомерности реализации той или иной концепции построения модели.

7. Необходимость в высокопрофессиональных специалистах, геологах по моделированию, к которым предъявляются достаточно высокие требования. Они должны обладать багажом глубоких знаний не только в геологии, но и в области математической статистики, иначе все разнообразие математических подходов и алгоритмов, реализованных в соответствующих ПО, приводит к возникновению эффекта «черного ящика».

8. Полнота и качество исходной геолого-геофизической информации.

Следует отметить, что зачастую все-таки предварительно необходимо построение 2D модели в качестве макета, содержащего основные элементы геологического строения изучаемого объекта, который к тому же относительно легко проверяем. На этапе построения 2D-модели формируется концептуальная модель осадконакопления, связности резервуара и так далее.

Привлечение данных сейсморазведки 3D для изучения литологической неоднородности и характера изменения ФЕС пластов-коллекторов является одним из важнейших преимуществ 3D-моделирования. Однако построение 3D-моделей не всегда решает проблемы обоснования негоризонтальных контактов, гидродинамической связности блоков и прочего.

Несмотря на имеющиеся трудности и неоднозначность получаемых решений, геологическое моделирование является тем инструментом, который на основе анализа мультидисциплинарных данных позволяет производить подсчет запасов, оценку рисков, планировать дальнейшую разработку месторождений.

**Валентин Колесов,**  
генеральный директор  
ЗАО «Пангея»

Добыча нефти и газа в настоящее время характеризуется увеличением доли нетрадиционных залежей углеводородов, доминированием горизонтальных эксплуатационных скважин и существенным усложнением геологического строения разведываемых и разрабатываемых месторождений. Требования к детальности и точности прогнозирования и моделирования резервуаров кардинально возрастают.

Для сланцевых залежей не подходят традиционные представления о геологическом строении. Горизонтальные скважины несут значительно меньше надежной информации о свойствах пластов, чем вертикальные и наклонные эксплуатационные скважины. В то же время незначительные ошибки в глубинах кровли и подошвы пласта, межфлюидных контактах, неоднородности и связности резервуара могут драматически повлиять на продуктивность горизонтальной скважины.

Задача изучения нефтяных резервуаров усложняется объективными недостатками используемых данных (являющимися основными источниками неопределенностей в прогнозах и моделях), такими как:

- Неполнота (нехватка информации, ее непредставительность).
- Нечеткость (недостаточная разрешающая способность) и наличие ложных эффектов.
- Стохастичность и зашумленность: случайный характер осадконакопления и заполнения ловушек; случайные погрешности измерений (например, изменение поверхностных условий в точке сейсмоисточника).
- Разномасштабность результатов исследований керна, ГИС, сейсморазведки, несейсмических методов.
- Многомерность связей геофизических атрибутов с параметрами резервуара (каждый атрибут меняется вследствие изменений нескольких параметров, каждый параметр отражается в изменениях нескольких атрибутов).

Общепринятые технологии интерпретации геофизических данных во многих случаях не обеспечивают получения требуемых сегодня результатов. Для уточнения моделей резервуаров необходимо перейти к представлению о геологоразведке как эксперименте по изучению свойств резервуара геофизическими методами и выполнять прогноз с использованием реальных, статистически, геофизически и геологически обоснованных связей между параметрами среды и измерениями. Применение технологий анализа больших данных (Big Data) способно обеспечить существенное повышение надежности и точности прогнозов.

**Сабина Кларнер,**  
технический директор,  
ООО «Кларенко»

В геолого-геофизической сфере деятельности недр изучаются в основном косвенными методами. На основе дискретных скважинных и сейсмических данных специалист разрабатывает модельное представление участка земной коры, а на основе этой модели затем принимаются весомые решения. Хотя прирост вычислительных мощностей позволяет постоянно увеличивать полноту и детальность моделей, они все равно могут учитывать только определенный объем информации — либо по причинам наличия и доступности этой информации, либо по причине стоимости моделей. При этом модель, как правило, будет более точная и однозначная в непосредственной близости к используемым скважинным данным. А с удалением от них, в зависимости от неоднородности разреза, возрастают неопределенность и абсолютная ошибка.

Уменьшить эту погрешность можно только путем привлечения дополнительной информации, либо дополнительных скважин — самый дорогой способ, либо извлекать более количественную информацию из площадных данных геофизических методов. А это помимо сейсморазведки могут быть и другие методы, как, например, электроразведка. Необходимо интегрировать в свою модель данные из смежных областей, но на практике это до сих пор внедряется недостаточно.

Сейсмические данные, особенно при обработке с сохранением амплитуд, обычно содержат значительный уровень некогерентных, негеологических шумов. Есть специальные, дорогие процедуры подавления этих шумов до и после суммирования, но они стандартно не применяются. Степень их применения зависит от конкретных геологических условий. Ограничения сейсмике в области низких частот обычно компенсируются с помощью применения низкочастотной, стартовой модели. В высокотехнологических ПО эта модель очень элегантно может быть получена по каркасу геологической модели с точным учетом горизонтов и нарушений, но пока мало кто это делает.

Большой плюс я вижу в использовании сейсмических интервальных скоростей в качестве тренда при заполнении низкочастотной модели в межскважинном пространстве. Высококачественная обработка сегодня дает очень детальное пространственное представление о скоростях по всему объему. Следующее препятствие — ограничения сейсмических данных в сторону высоких частот. Проблему можно решать уже непосредственно на этапе геологического моделирования путем применения специальных алгоритмов взвешивания скважинной и сейсмической информации при заполнении геологической модели свойствами. Здесь опять требуется взаимодействие геолога, петрофизика и геофизика — каждый по себе хорошо знает, до какой степени можно доверять своим данным, какую точность они реально имеют.

Последнее, но не менее важное ограничение, особенно в регионах с сложным минералогическим составом пород, это существенное перекрытие свойств литотипов в области упругих параметров. В таких случаях целесообразно применять вероятностный подход к интерпретации результатов инверсии. Стохастическими методами строятся палетки упругих свойств пород, а по результатам инверсии для каждого сейсмического объекта определяется вероятность, с которой он попадает в область свойств того или иного литотипа.

Большой прогресс в последние годы наблюдается в области электроразведки. На основе структурно-литологической модели по данным скважин и сейсморазведки, путем инверсии результатов электромагнитного зондирования строится трехмерная модель распределения сопротивления по разрезу, которая в зависимости от поставленных задач помогает выделить насыщенные объекты или другие тела с аномальным сопротивлением. Включение этой информации в трехмерное геологическое моделирование помогает существенно снизить неопределенности при выделении перспективных объектов.

Улучшение прогнозной и оценочной эффективности геологических моделей является недорогой возможностью уменьшения рисков и неопределенностей и, следовательно, значительного снижения затрат на разведку и добычу углеводородного сырья. Совместное количественное использование сейсмической, скважинной и геологической информации ведет к построению более детальных и точных моделей, кроме того, такие модели позволяют выполнять более реалистичную оценку запасов и планирование разведочного и промыслового бурения.

**Станислав Сикорский,**  
главный менеджер-  
геофизик, отдел  
промысловой  
геофизики  
Департамента  
геофизических работ  
АО «Росгеология»

Геолого-геофизические данные для построения моделей условно можно разделить на три группы: надежные данные (керна, испытания пластов, ГИС); мягкие (сейсморазведка 2D, 3D, ВСП); - редкоиспользуемые (гравимагниторазведка, электроразведка, геохимия).

Всем им присущи недостатки, которые затрудняют построение моделей:

нехватка информации (не полные данные); недостаточная разрешающая способность (не полный вынос керна, не высокая разрешающая способность методов ГИС); случайный характер формирования залежей (погрешности геолого-геофизических данных); некачественные замеры ГИС, описание керна; устаревшее оборудование; использование упрощенных моделей.

Задача построения модели месторождений может быть качественно решена при многомерной интерпретации геолого-геофизических данных.