

Геофизики о множестве «Не»



Геология, как основная и старейшая наука о Земле, модернизировалась с течением времени, развивая все более сложные механизмы изучения недр. Особняком в геологической науке стоит направление геофизики, которое в отдельную отрасль выделилось только в 40–60-е годы XX века. Развитие геофизических исследований обязано в первую очередь мощному математическому аппарату, однако описание природных процессов строгими математическими формулами представляется делом сложным и неблагодарным.

Корректность полученных геофизических данных, будь то сейсморазведка, электроразведка, каротаж, во многом зависит от тех допущений и приближений, которые делаются при обработке и интерпретации данных. Сам по себе граф обработки и интерпретации — это некий набор математических уравнений и алгоритмов, через которые проходят данные.

Известным примером этого может служить простая линейная система уравнений:

$$\begin{cases} X+10Y=11 \\ 10X+101Y=111 \end{cases}$$

Решение системы уравнений находится путем самых простых математических операций, и оно выглядит так: $X=1$, $Y=1$.

Добавим в систему немного геофизики. Если всего на одну десятую изменить правую часть первого уравнения системы:

$$\begin{cases} X+10Y=11,1 \\ 10X+101Y=111, \end{cases}$$

то решение будет выглядеть совершенно другим образом: $X=11,1$, $Y=0$. То есть математический аппарат определения решения остается одинаковым для этого класса задач, но небольшое изменение исходных данных привело к резкому изменению значений ее решения.

Подобная система может описывать некоторый реальный объект или процесс. В таком случае коэффициенты и правые части уравнений являются прямыми результатами измерений, или они могут быть вычислены по результатам исследований. Следовательно, они известны с некоторой погрешностью. Возникает следующий вопрос — какую практическую ценность может иметь решение подобной системы? И естественный ответ — никакой.

С появлением таких проблем математики ввели понятие корректно поставленной задачи, которая удовлетворяет определенному набору требований. Задачи, которые не входят в это число, считаются некорректными.

Если вернуться к реальным геофизическим задачам, то нужно понимать, что все задачи геофизики, решение которых необходимо для нефтегазовой отрасли, а впрочем, и не только нефтегазовой, являются обратными, когда по наблюдаемым значениям определяются породившие их геологические тела (свойства и размеры). В этом случае сложность таких задач состоит в том, что абсолютно разные причины могут приводить к очень близким эффектам, то есть решений, как правило, может быть несколько. Иначе говоря, обратная задача некорректна. Сегодня, несмотря на достаточно высокий уровень развития информационных технологий, некорректность и нелинейность обратных задач геофизики являются большой проблемой всей мировой геофизической отрасли. Об абсолютном решении этих вопросов говорить не приходится, так как самой природой заложена нелинейность земных процессов. Можно говорить лишь о снижении влияния этих эффектов на конечный результат.

А значит, компании, которые будут развивать данное направление, расширяя свою технологическую, информационную и техническую оснащенность, смогут занять ведущие роли на рынке геофизических услуг.

Мы пригласили к разговору об этой сложной и неоднозначной проблеме представителей геофизических, нефтесервисных, IT-компаний, а также ведущих научных деятелей.

Юрий Ампилов,
профессор, д. ф.-м. н., заслуженный деятель науки РФ

Революции не ждем

Если быть объективным, то сейсморазведка за последние 20 лет не так уж сильно изменилась технологически. Почти все ее значимые достижения обусловлены мощным развитием систем связи, телекоммуникаций и компьютерных технологий, которыми сейсморазведка воспользовалась, да и то пока не в полной мере. А новых сейсмических методов, по большому счету, не появилось.

НОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20 ЛЕТ, ПО БОЛЬШОМУ СЧЕТУ, НЕ ПОЯВИЛОСЬ

Метод ОГТ известен с середины 60-х годов XX века, а в модификации 3D — с конца 70-х годов, то есть более 40 лет назад. После действительной революции начала 70-х годов — перехода на цифровую запись — в сейсморазведке идет лишь эволюционное развитие источников возбуждения, регистрирующей аппаратуры, программного обеспечения обработки и интерпретации данных. Все это способствует повышению достоверности получаемых результатов, однако революционного скачка не произошло.

Необходимо отметить тот факт, что наиболее крупные месторождения с несложным геологическим строением уже открыты в традиционных районах нефтегазодобычи. А новые объекты отличаются и небольшими размерами, и более сложным строением. Поэтому для повышения достоверности с учетом этих новых вызовов требуются и новые технологии.

Традиционно решение этих вопросов ищут в расширении спектра регистрируемых сигналов, увеличении динамического диапазона, совершенствовании систем и методов обработки.

Условная корректность

Обратные задачи геофизики не корректны в общем смысле. Их пытаются сделать условно корректными, что фактически накладывает ограничения на тип получаемого решения, а значит, и на модель среды, которая может быть не вполне адекватна реальному геологическому строению. Поэтому теоретические решения имеют не так много практических приложений.

На заре своего рождения и до недавнего времени сейсморазведка решала в основном структурные задачи по картированию отражающих горизонтов и справлялась с ними в большинстве случаев неплохо. Но достоверность предсказания свойств и состава пород и в настоящее время остается не очень высокой. Много зависит от сложности сейсмогеологических условий изучаемой среды.

Сейсмогеологическая сложность

Мы специально занимались этой проблемой несколько лет назад и выработали некую классификацию сложности сейсмогеологических условий. Все их многообразие условно разбили на три категории: простые (I), сложные (II) и очень сложные (III), снабдив их соответствующими признаками.

Для простых сейсмогеологических условий достоверность сейсморазведки может быть очень высокой, и требуется минимальное количество разведочных скважин, чтобы подготовить запасы по категории C_1 . А для очень сложных сейсмогеологических условий (сильное экранирование, сложная тектоника и т. п.) информативность сейсморазведки может быть крайне низкой, и тогда потребуются очень большое количество скважин для полноценной разведки месторождения.

А говорить о достоверности сейсморазведки вообще считаю некорректным. Но одно можно сказать точно: она выше, чем у любого другого геофизического метода.

Человеческий фактор против ПО

Современное программное обеспечение (ПО) само по себе не может сильно повысить достоверность результатов. Обработка и интерпретация лишь завершает некий производственный цикл сейсморазведочных работ. Уровень современного ПО постоянно растет, появляются новые алгоритмы и программы, которые постепенно повышают общий уровень достоверности конечного результата.

ГОВОРИТЬ О ДОСТОВЕРНОСТИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ВООБЩЕ СЧИТАЮ НЕКОРРЕКТНЫМ

Но ПО — это всего лишь инструмент в руках человека. С его помощью два разных специалиста с различной квалификацией зачастую могут получить противоположные результаты. Поэтому достоверность в большей степени зависит от умения, опыта и квалификации персонала. А с этим в отрасли немалые проблемы.

Большинство студентов-геофизиков, заканчивающих вузы, не имели возможности пройти хорошую производственную практику во время учебного процесса. Для этого обычно требуется много лет, чтобы из выпускника вырос полноценный специалист, способный постоянно обучаться и совершенствоваться, чтобы овладевать новыми приемами и знаниями. Поэтому по-прежнему, как и ранее, главное — это люди.



Представитель «Геотек Холдинга»**Проблема — в поле**

Основными проблемами технологического развития сейсморазведки с точки зрения повышения достоверности является постоянное усложнение сейсмогеологических условий поисков и разведки залежей нефти и газа, увеличение глубинности исследований. Простых, крупных, легко отождествляемых месторождений, залежей уже давно нет, отсюда — сложность их обнаружения и детализации.

Технологическое оснащение сейсморазведки не стоит на месте, а, постоянно развиваясь, движется в направлении повышения детальности и достоверности от работ методом отраженных волн (МОВ) к методике общей глубинной точки (ОГТ) 2D, затем 3D, 3 C, 4D, а сейчас и UniQ.

Проблема больше заключается в отсутствии всесторонне развитой методики, позволяющей контролировать качество полевой информации на этапе сбора исходных полевых данных.

«Классика» сейсможанра

Благодаря использованию «классической» сейсморазведки (2D и 3D) прежде всего увеличилось значение такого важного показателя, как процент успешного бурения, существенно возросла извлекаемость сырья. Также 3D сейсморазведка впервые предоставила геологам, геофизикам и промысловикам возможность получать информацию о строении среды в межскважинном пространстве, формируемую по результатам динамического анализа сейсмического волнового поля, проводимого на базе точной скважинной информации.

ПРОСТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УЖЕ ДАВНО НЕТ

Тем не менее современные жесткие требования к надежности получаемых геофизиками результатов, обусловленные увеличением сложности строения коллекторов и верхней части разреза (ВЧР), не всегда могут быть в полной мере удовлетворены. Например, технологии площадной сейсморазведки ограничены физическими пределами сейсмических методов и не позволяют более детально описывать тонкие и высокорасчлененные (акустически слабоконтрастные) пласты. Определенную проблему для продольных волн составляет газовая шапка, под которой в некоторых случаях формируется зона «тени», не позволяющая производить структурные построения.

В настоящее время на многих хорошо изученных территориях объектами поиска являются малоамплитудные поднятия и краевые части месторождений, в этой связи чрезвычайно важной задачей становится точное восстановление структурной поверхности глубоких горизонтов. Для «классической» сейсморазведки здесь обычным пре-

пятствием является высокая изменчивость свойств относительно тонкого, с точки зрения традиционной сейсморазведки, интервала отложений в верхней части разреза, что приводит к искажению реальных структурных планов. Самая же слабая сторона современной сейсморазведки, судя по публикациям последних 10 лет, — это прогноз коллекторских свойств до бурения скважин.

За дополнительной информацией

Исторически так сложилось, что все существенные достижения сейсморазведки появлялись в основном за счет значительного увеличения объема и качества первичной информации, добываемой в полевых условиях.

К тому же в сейсморазведке до сих пор недостаточно внимания уделяется методическим приемам повышения точности определения скоростей распространения сейсмических волн по сейсмограммам, зарегистрированным на дневной поверхности, хотя эффективные скорости являются атрибутами, необходимыми как для построения структурных поверхностей (так же как и времена прихода волн), так и для определения интервальных скоростей, на основе которых осуществляется прогноз литологии и флюидонасыщенности разреза.

К настоящему времени имеются примеры, когда в результате отказа от широко применяемых ныне «упрощенных» способов учета аномалий ВЧР и использования для этой цели дополнительной, добываемой в поле информации произошло снижение ошибок структурных построений в 1,5–2,5 раза, а также увеличение вероятности обнаружения малоамплитудных объектов и прогноза их коллекторских свойств.

Также уже давно доказано теоретически, что дополнительным источником информации, которая может снизить неопределенность геологического прогноза, могут служить поперечные и обменные волны, которые на практике довольно редко регистрируются при проведении полевых работ и поэтому в производственном масштабе не используются ни для прогноза литологии разреза, ни для прогноза его насыщения.

Следует отметить, что для прогноза насыщения и литологии по данным многоволновой сейсморазведки необходимо наличие экспериментальной базы с информацией о связях литологии и насыщения. Эту проблему может решить регулярное проведение многокомпонентной регистрации волновых полей в окрестности скважин, где проводится многокомпонентное ВСП.

Валентин Колесов, генеральный директор ЗАО «Пангея»**Не исказить картину**

Для разных сейсмогеологических условий проблемы (или, как более удачно говорят по-английски, вызовы), стоящие перед сейсморазведкой, сильно различаются. Общим для всех технологических вызовов является человеческий фактор.

Повышающаяся сложность и капиталоемкость сейсмических технологий создает плодородную почву для спекуляций по формуле обман — деньги — обман. Несбыточные обещания чудес от новых технологий превращаются в затратные проекты, вложенные средства на которые не позволяют признать их неудачными. Эта опасность реальна, она ведет к дискредитации новых технологий перед специалистами и к искаженной картине возможностей геофизики у руководителей нефтегазовых компаний. Избежать ее можно только вводя обязательный этап пилотного проекта с последующим анализом его результатов и принятием решения о целесообразности полномасштабных работ.

ОПАСНОСТЬ — В ДИСКРЕДИТАЦИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Несомненно, нелинейные эффекты имеют место при отражении сейсмических волн от границ флюидонасыщенных пористых сред. Однако количественная оценка их величины в реальных условиях разведочной сейсморазведки — очень интересная тема, подробных и добросовестных исследований которой на сегодня недостаточно, чтобы делать какие-то строгие выводы.

Не сейсмикой единой

Некорректность решений обратной задачи может быть компенсирована дополнением в граф интерпретации прямой задачи (моделирования). Более убедительным для геологов, использующих полученные геофизиками решения, является проверка скважинами — пробуренными как ранее, так и после сдачи результатов сейсморазведочных работ.

Незаслуженно мало используются данные несейсмических геофизических методов, которые во многих случаях могут снизить неоднозначность результатов сейсморазведки.

Софт «за» достоверность

Развитие программного обеспечения продолжается, и достоверность результатов повышается за счет применения более интенсивных вычислительных процессов, с одной стороны, и расширения набора атрибутов и методов их комплексной интерпретации, с другой.

Когда мы 20 лет назад сделали первый коммерческий софт, позволяющий одновременно интерпретировать несколько сейсмических (и несейсмических, если необходимо) атрибутов, мы оценили уровень зарубежных научных разработок и пришли к выводу, что через 2–3 года появятся зарубежные аналоги. Так и произошло, но и сегодня это ключевое направление интерпретации далеко от полной реализации своих возможностей, хотя его элементы реализованы во многих коммерческих пакетах.

В геомеханику

Прорывным направлением, по нашему мнению, должен оказаться детальный анализ сейсмических скоростей, выполняемый за рамками метода ОГТ. Помимо уточнения структурного плана и прогноза литологии малоизученного разреза, скорости на сегодня — основной вклад геофизиков в геомеханику.

Направление геомеханики, которое изучает напряженно-деформированное состояние среды, сейчас явно на подъеме. Реальные возможности геомеханики для поисково-разведочных целей и моделирования разработки месторождений пока не ясны и, скорее всего, сильно переоцениваются, но развитие этого направления безусловно принесет новый взгляд на объяснение некоторых эффектов, наблюдаемых при разработке месторождений, и — в оптимистическом сценарии — поможет в предсказании этих эффектов.

Дмитрий Ильинский, главный геофизик ЗАО «Геонод Разведка»

Только скважины

Достоверность сейсмических данных проверяется бурением. Поэтому необходимо ответить на вопрос: «Соответствуют ли полученные сейсмические изображения и прогнозируемые по ним свойства пород той реальности, которую вскрывают скважины?»

Сейсмические данные проходят долгий путь, пока не превратятся в тот продукт, которым пользуются геологи для планирования положения новой скважины, и на каждом этапе могут возникнуть проблемы с адекватностью применяемых технологий, сказывающиеся на достоверности полученного результата.

Выбор съемки

При сборе сейсмических данных важно правильно спланировать съемку.

Наиболее достоверные результаты дает полноазимутальная трехмерная съемка, однако ее применение в морских условиях значительно повышает стоимость производимых работ.

Четырехкомпонентная донная морская полноазимутальная съемка дает наиболее достоверный результат, но существующие технологии ее проведения во много раз дороже традиционной узкоазимутальной съемки с буксируемыми косами. Поэтому тут важно иметь предварительную информацию о геологии исследуемого района. Если строение ожидается относительно простое, то тут достаточно узкоазимутальной съемки.

В районах с солонкуполойной тектоникой или широким распространением базальтов, или в местах выходов газовых столбов, где требуются достоверные изображения под этими структурами, для получения более достоверной картины лучше применять полноазимутальную

четырёхкомпонентную съёмку с достаточными удалениями источник — приёмник. В морском варианте такую возможность даёт донная съёмка. Поэтому на сегодняшний день самой актуальной является проблема дать промышленности технологичный инструментарий для проведения оптимальной по затратам донной съёмки, чтобы её стоимость и производительность были бы сопоставимы с устоявшейся технологией донных кос.

И сбор, и обработка

Этап сбора данных (его план и качество выполнения), по сути, определяет достоверность полученных изображений. Однако и этап обработки данных (построения сейсмических изображений по собранным сейсмо-данным) также важен, и сейчас появилось много новых и эффективных процедур очистки данных от различного типа шумов, многократных отражений, повышения четкости изображений. Важно корректно ими пользоваться, чтобы, с одной стороны, не удалить вместе с шумом реальную информацию, а с другой — не привнести в итоговое изображение несуществующую информацию, сложенную из шума.

По этой причине случается, что геологи — интерпретаторы старой школы — иногда предпочитают пользоваться хуже обработанными и более шумными изображениями, полученными по старым графам обработки, а не использовать современные красивые картинки.

Попытки уйти от некорректности...

Обратные задачи геофизики не корректны.

Как известно, французский математик Адамар предложил условия, при которых задачу можно считать корректной — это существование и единственность решения, а также его устойчивость (малые изменения входных данных приводят к малым изменениям результата). Адамар считал, что имеет смысл решать только корректно поставленные математические задачи. Но геофизики решали свои задачи, не зная об этих ограничениях.

Математический аппарат решения некорректных задач был разработан в 70-е и 80-е годы XX века в Советском Союзе школами А. Н. Тихонова и М. М. Лаврентьева. Существует обширная литература по решению некорректных задач геофизики.

В практическом смысле основная идея решения некорректных задач основана на ее регуляризации, то есть накладывании некоторых ограничений, или привлечении дополнительных данных о решении задачи, при которых она становится корректной. «Некоторые ограничения» на решение берут из априорной информации (то есть предварительные данные о геологическом строении района). Если априорная информация выбрана неверно и ограничения на решения установлены неправильно, то и результат будет недостоверен.

Например, в морской сейсморазведке проведение узкоазимутальной съёмки в неверном направле-

нии и не получено изображение подсолевых структур, и в то же время при проведении полноазимутальной съёмки эти отражения хорошо видны.

... и нелинейности

Одна группа нелинейных явлений связана с сильным воздействием на среду, к примеру, группой вибраторов. Сейсморазведка работает в дальней зоне от источника, где процесс распространения волн хорошо описывается линейными уравнениями в частных производных.

Нелинейные свойства грунтов проявляются также при воздействии достаточно сильной падающей сейсмической волны от землетрясения в эпицентральной зоне. Для сейсморазведки имеет значение нелинейность, связанная с неупругим затуханием распространяющихся волн и с частотной избирательностью геологической среды.

Разработаны методы учета этой нелинейности при обработке сейсмических данных и особенно при интерпретации поведения амплитуд сейсмических волн для прогнозирования вещественных свойств пород. Здесь, во многом из-за сложности среды и ее адекватного математического описания, преобладает эмпирический подход, основанный на использовании скважинной информации.

Софт, кадры и модель

Современное программное обеспечение для обработки и интерпретации даёт сильное средство в руки геофизиков, и важно правильно им распорядиться. Для получения достоверных изображений среды большую роль играет эмпирический опыт обработчика и интерпретатора. Достоверность полученных результатов повышает также использование полноволнового упругого моделирования для тестирования и лучшего понимания графа обработки и интерпретации.

Майкл Дан, старший директор направления «Обработка и интерпретация сейсморазведки», Halliburton,

Кристоф Сторк, руководитель исследований направления «Обработка и интерпретация сейсморазведки», Halliburton

Владислав Брылин, ведущий консультант по геофизике Halliburton

О трудностях...

Достоверность сейсмических данных зависит от области исследований. К примеру, для областей, где скорость в породе значительно меняется горизонтально из-за изменений в стратиграфии, а целью изучения является структурная ловушка, то наибольшей проблемой становится достоверность скоростной модели при переходе временного разреза в глубинный. Если модель недостаточно точна, то положение структуры может не соответствовать действительности, что приводит к бурению «сухой» скважины.

Качество получаемых данных может ухудшаться из-за неправильно проведенной сейсмосьёмки,

недостаточно хорошей скоростной модели, недостатков алгоритма обработки данных. С такими проблемами часто сталкиваются геофизики при исследовании глубоководных участков, а также подсолевых зон.

В большинстве случаев современные системы сбора и обработки информации могут решить эти сложности. Но если по какой-то причине сбор данных был осуществлен неправильно, то необходимо проводить сейсмику повторно. В глубоководных районах, таких как Мексиканский залив, стоимость скважины может достигать \$150 млн, поэтому многие компании не проводят бурение без надлежащей сейсмостъемки.

... и их преодолении

Повысить достоверность получаемых данных можно с помощью проектирования оптимальных систем наблюдения, подбора источников упругих колебаний с точки зрения решения геологических задач, поднятия культуры производства работ в поле.

Обратные задачи сейсмики — некорректны, нелинейны, так как используются различные упрощения, не всегда соответствующие реальной модели среды. Эти проблемы известны уже давно.

В этом случае на помощь приходят здравый смысл, опыт и комплексирование с другими методами изучения земной коры.

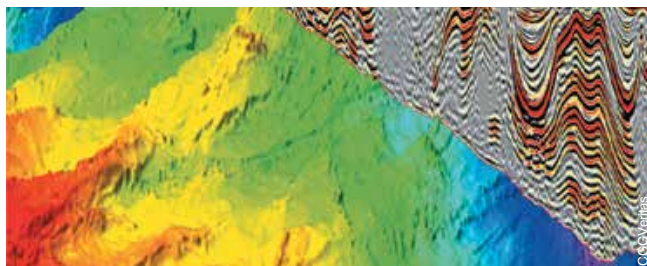
Все зависит от исполнителей

Стремительное развитие компьютерного аппаратного обеспечения позволило геологам и геофизикам решать сложнейшие задачи. На рынке присутствует множество участников в сфере разработки и продажи геофизического ПО. Принципиальной разницы в применяемых алгоритмах нет. Вопрос достоверности зачастую упирается в конкретных исполнителей, их опыт работы, умение нестандартно мыслить и комплексировать информацию из разных источников для уменьшения неопределенностей, а также знание конкретного региона работ.

Кирьянова Татьяна, начальник отдела интерпретации
Ingenix Group

Искусство интерпретации

Со стремительным развитием компьютерных технологий появилась возможность получить ответы на сложнейшие вопросы в обработке сейсмической информации. Еще несколько лет назад решение многих задач приходилось значительно упрощать из-за низкой вычислительной скорости. Использование профессиональных графических видеокарт нового поколения привело к прорыву в трехмерной визуализации данных, и интерпретация сейсморазведки превратилась в настоящее искусство.



Производители программного обеспечения идут в ногу со временем. Новые решения, новые алгоритмы, новые технологии встраиваются в существующие программы крупными международными компаниями (Schlumberger, Landmark, Paradigm, Fugro Jason и др.), и что особенно радует, также и российскими компаниями («Сейсмотек», ИННТ и др.).

Существуют многочисленные примеры подтверждения результатов обработки и интерпретации данных сейсморазведки, как структурного плана, так и прогноза свойств, бурения новых скважин.

Качество исходных данных

Большинство недропользователей не считают нужным вкладывать средства в проектирование и постановку современных съемок 3D, запись широкополосной акустики, плотностного каротажа, ядерно-магнитных методов и так далее.

Зачастую именно недостаток и/или плохое качество входной геолого-геофизической информации не позволяет решить поставленные задачи, то есть дать достоверное решение.

Комплексирование

Невозможно получить именно от сейсмиков достоверную картину строения продуктивных объектов. Только использование всей информации по сейсморазведке, данных ГИС, керна, результатов испытаний и гидродинамических исследований в скважинах, только совместная работа в мультидисциплинарных группах может решить сложные геолого-геофизические задачи.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ПРЕВРАТИЛОСЬ В НАСТОЯЩЕЕ ИСКУССТВО

Ошибки в передаче результатов от сейсмиков к геологам, от геологов к разработчикам, несогласованность геологических идей и «заикленность» на своей специализации оказывают гораздо большее негативное влияние на управленческие решения, чем отдельные ошибки на каждом отдельном этапе работ.

Таким образом, достоверное решение геолого-геофизических задач зависит от сочетания трех факторов: качества входной информации, применения современных технологий и совместной работы профессионалов различных специальностей. ●