

ПУТЬ ОСОЗНАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ В ГЕОФИЗИКЕ.

В.А.Кочнев

Истина – конкретна.
Автор неизвестен.
Нам не дано предугадать,
Как наше слово отзовется.
Ф.М.Тютчев

Внимательно прочел статью С.В. Гольдина [1] и во многом с ним согласен. Конечно же, истина не рождается в дискуссии. Она существует сама по себе. Но в обсуждении мы каждый со своей точки зрения, со своей позиции, с учетом своего опыта видим по-своему пути развития геофизики в ближайшие годы. Ведь об этом идет речь в статье уважаемых ученых [1, 2, 3].

В.Н.Страхов считает необходимым навести «идейный порядок» в области разработки новых методов интерпретации. Он считает, что создание математической геофизики – главный путь развития.

О.К.Кондратьев, не отрицая необходимости развития математической составляющей и общей методологии, считает, что главное не в математизации, а в создании таких методов, которые бы работали, способствуя решению геолого-геофизических задач.

Я в какой-то мере готов согласиться с В.Н.Страховым, что необходима методология, но она, с моей точки зрения, должна быть стройной и непротиворечивой. Мы же говорим о простоте моделей, а с другой стороны, провозглашаем 22 принципа. Явный перебор. Проверьте, сможете ли вы перечислить их на память. В порядке эксперимента я проверял согласованность наших подходов с принципами В.Н.Страхова. Они почти полностью согласуются. Оговорку вызывает один. С определенными условиями можно согласиться и с ним. Это говорит о том, что эти принципы разумны и независимо мы приходим к их пониманию. Но если бы меня попросили сформулировать принципы, которые были бы положены в основу, я бы сформулировал их в трех словах: простота, конструктивность и эффективность. Все эти три принципа применимы и к математическим моделям, используемым для решения прямой задачи, и к методу решения обратной задачи и подхода к решению конкретной геофизической задачи и к комплексу задач.

Я, конечно же, согласен с необходимостью математических моделей, связывающих модель среды и поля. И эту позицию я и попробовал развить в данной статье.

С.В. Гольдин видит главную задачу геофизики (сейсмоки) в создании математических моделей, адекватных физико-механическим, позволяющих решать более сложные, более тонкие задачи, такие как мониторинг залежей в процессе их эксплуатации. Задача безусловно очень сложная. Я бы сказал, комплексная научно-техническая проблема. Она включает в себя не только разработку новых математических моделей, но и создание систем алгоритмов и программ, которые бы учитывали все ранее полученные данные, в том числе данные ГИС. Она должна включать в себя методику проведения полевых наблюдений 4D в условиях сильной зашумленности объектов от работающих механизмов добычи и обслуживания. Проблема безусловно сложная, но интересная и в процессе ее решения могут быть получены новые методы. Следует заметить, что многое делается в этом направлении. Делаются попытки найти новые модели и эффекты, связанные с залежью, создаются новые системы обработки и интерпретации. Разрабатываются методы выделения слабых сигналов на фоне сильных помех.

Но вернемся к теме статьи, обозначенной в заглавии.

В начале 70-х годов, когда у нас появились первые ЭВМ и устройства преобразования аналоговых магнитных записей в цифровые, встала задача коррекции статики при суммировании трасс по методу ОГТ. В то время мной была сделана попытка решить задачу определения статики, кинематики в рамках одной задачи, используя решение линеаризованных уравнений. Был рассчитан небольшой модельный пример и составлена система линейных уравнений. Неизвестными были статические поправки за ПВ, ПП, нулевые времена и скорости. В правую часть были включены рассчитанные по модели времена пробега волн. Данные были введены в существ-

вующую тогда программу решения СЛУ на ЭВМ «Наири». Получили фантастический результат: статика изменялась от -1000 до 1000 мс и в таких же пределах получались нулевые времена. Но мы-то задавали их в модели практически одинаковыми, а статика на пунктах приема (ПП) моделировалась в пределах ± 10 мс.

Даже после того, как система была упрощена, абсурдность результатов не переставала удивлять. Только в тривиально простом случае удалось что-то получить. Этот опыт отбил у меня охоту решать подобные задачи, используя системы линейных уравнений. Период охлаждения длился около 5 лет. Если бы тогда меня спросили о применимости СЛУ для решения задач сейсмологии, я ответил бы отрицательно. Я мог бы привести много аналогичных примеров из опыта других геофизиков. Да и геофизики сами могут рассказать много аналогичных примеров.

К этой же задаче статистики и кинематики я вернулся снова в конце 70-х годов. Но эту же задачу я решил поставить по-другому. В постановке появилось три существенно новых пункта.

1) Задача ставилась не на определение параметров модели, а на их уточнение т.е. предполагалось, что априорно известны начальные приближения параметров. Например нулевые времена мы могли взять из преломления, скорости из предварительного анализа, статистику рассчитать по рельефу.

2) Для того, чтобы учесть возможную погрешность начального приближения требовалось задание и этих параметров (т.е. погрешностей начального приближения).

3) Каждое значение времени прихода волны, стоящее в правой части, также характеризуется своей погрешностью, зависящей от соотношения сигнал-шум, чем выше соотношение тем меньше погрешность. Соотношение сигнал-шум оценивался алгоритмом автоматического прослеживания волн по нескольким горизонтам.

При подобной постановке задачи удалось свести к уточнению неизвестных параметров по невязке. Строгое обоснование метода решения было сделано с участием Г.А. Устюжанина. Особенностью данного итерационного метода оказалось то, что он позволяет уточнять неизвестные по каждому уравнению по мере их поступления, т.е. метод позволяет оперативно учитывать априорную и текущую информацию, т.е. он обладает основным свойством адаптивности.

В процессе исследования [10] было установлено, что метод обладает следующими особенностями:

1) Он не накапливает ошибок, что позволяет использовать его при решении систем с большим числом уравнений и неизвестных.

2) Он обладает свойствами регуляризации (т.е. степень уточнения зависит как от погрешности значения в правой части (при большой погрешности уточнение практически не происходит), так и от величины погрешности неизвестного, сформировавшейся к данному моменту. В каждой новой итерации степень уточнения уменьшается за счет уменьшения невязки и за счет уменьшения погрешностей неизвестных.

3) Он позволяет уточнять неизвестные по каждому уравнению в отдельности т.е. можно по одному уравнению уточнить несколько неизвестных. Из множества вариантов уточнения выбирается тот, который ближе к значениям неизвестных, сформировавшимся к моменту уточнения. Ближайший в статистической постановке – обеспечивающий максимум критерия правдоподобия. В детерминированной постановке ближайшие значения – это координаты основания перпендикуляра, опущенного из априорной точки на гиперплоскость уравнения (метод Качмажа). То есть наш адаптивный метод является статистическим обобщением известного итерационного метода Качмажа. Интересно, что когда метод создавался то мне не было известно о существовании детерминированного варианта метода. Мне на него указали математики ВЦ СО АН (теперь Института вычислительного моделирования СО РАН).

Последняя особенность метода (уточнение параметров по одному уравнению позволяет более обоснованно проводить линеаризацию нелинейных уравнений. При определении производных, являющихся коэффициентами уравнения, используются уточненные к этому моменту неизвестные. Кроме этого уточненные параметры модели позволяют более точно прогнозировать времена прихода волн, а это позволяет сократить диапазон поиска искомого экстремума и уменьшает вероятность грубой ошибки (за счет перехода на фазу) во времени прихода волны, кото-

рая будет входить в правую часть очередного уравнения. Такой адаптивный алгоритм позволяет автоматизировать процесс прослеживания волн и оценки параметров модели среды и статистических поправок. Критерием правильности процесса прослеживания и уточнения является качество временного разреза, т.е. соотношение сигнал-помеха на временном разрезе. Эта же особенность позволяет не хранить в памяти матрицу коэффициентов системы, а формировать их для каждого уравнения в тот момент, когда появляется очередь данного уравнения. Это имело большое значение, когда память ЭВМ была ограничена.

Для геофизиков, занимающихся обработкой данных важным является технологичность созданных программ. В те теперь уже давние времена прошлого века разработанный пакет АДАПТА успешно работал на ЭВМ БЭСМ-6 на ВЦ Главтюменьгеологии. Интересен был процесс тестирования и обкатки.

Как всегда в таких случаях, проводилось сравнение полученных результатов с результатами лучших принятых на ВЦ разработок. В качестве оппонирующих разработок использовались программы Сайбера, бывшие в тот момент последним «писком» зарубежных достижений. Они содержали в себе программы коррекции как высокочастотной, так и длиннопериодной статики. Опробование проводилось на сейсмических данных Муравленковского месторождения. Верхняя часть разреза площади осложнена неоднородностями вечномерзлых пород, вызывающих перепад в статике ± 30 мс и более. По результатам опробования комиссией был сделан вывод о преимуществах пакета перед существующими в тот момент разработками. В течении 2-х лет, пока работала БЭСМ-6, было обработано с применением пакета АДАПТА около 60000 сейсмограмм. Причем обрабатывались наиболее сложные площади. Следует заметить, что, наряду с коррекцией высокочастотной статики, корректировалась и длиннопериодная статика. Такие технические детали я привожу для того, чтобы сказать, что существуют эффективные методы решения систем алгебраических уравнений, применение которых при соответствующем технологическом (программном) оформлении позволяет решать сложные задачи сейсмоки. Одна из них – коррекция статики и кинематики – до сих пор остается большим местом при обработке сейсмических данных, полученных в условиях неоднородной мерзлоты. Коррекция статики «вручную» с использованием современных возможностей визуализации результатов – тоже не выход. Во первых: это трудоемкая ручная работа и во-вторых при ручных вариантах при больших объемах возможны значительные субъективные погрешности. Более оптимальным является вариант сочетания автоматизированных технологий с участием геофизика. Но роль его будет сводиться к контролю и подсказке в трудных нестандартных ситуациях. Наши исследования и опыт освещены в работе [8].

Далее адаптивный метод использовался для коррекции статики по первым вступлениям [5,8]. Пакет программ автоматического прослеживания волн в первых вступлениях (прямых и преломленных), был разработан А.В.Антоненко и использовался при обработке сейсмических данных, полученных в Восточной Сибири. В настоящее время адаптивный метод используется не только для коррекции статики, но и для определения координат забоя бурящейся глубокой скважины [12]. Н.Б.Пивоварова и Т.А.Тушко с участием автора провели исследование адаптивного подхода для решения обратной сейсмологической задачи, в которой определялись координаты источников землетрясений и уточнялась скоростная блочная модель Кавказа. Особенностью задачи было то, что и времена пробега, и производные рассчитывались численно, а не аналитически, как в предыдущих задачах. В результате исследований было установлено, что итерационно-адаптивный метод обеспечивает быструю сходимость и дает более устойчивые результаты по сравнению с методом полной статистической постановки, требующий хранения и обращения ковариационных матриц [6,7,8].

Далее была обратная динамическая задача в сверточной модели Баранова-Кюнеца. С помощью адаптивного метода ее удастся решить, расчленив на две: оценки формы сигнала и коэффициентов отражения[9].

Важность решения этой задачи трудно переоценить по двум причинам:

- 1) От волновых полей мы переходим к оценке параметров среды: коэффициентов отражения и акустических жесткостей. Здесь уже каждый экстремум имеет четкий физический смысл: экстремумы коэффициентов отражения – соответствуют границе слоев, а экстремумы акустических жесткостей – значениям эффективной акустической жесткости. Теперь на временных разрезах геофизик видит не волновое поле, а модель параметров среды, в увязке с данными ГИС.

2) При оценке параметров формы сигнала, сформировавшегося в результате обработки, мы вынуждены использовать априорные данные ГИС по ближайшей скважине. Следует отметить, что обратная динамическая задача решается нами как во временной, так и в спектральной областях. В процессе решения этой задачи для площади возникает много интересных задач, которые или решены, или находятся в процессе решения.

Возможно, подобный подход, но в другой математической модели (м.б., в 2-ч или 3-х мерной) может быть использован и при решении проблемы мониторинга, затрагиваемой в статье С.В.Гольдина [1].

Но все это были сейсмические задачи, в которых присутствовали алгебраические нелинейные уравнения. Мне очень хотелось проверить адаптивный метод на традиционных задачах, которые легко сводятся к системам алгебраических уравнений и сопоставить наши возможности с теми, которые используются в области гравиметрии и магнитометрии. С подсказки В.В.Ломтадзе и с участием В.И.Хвостенко мы создали пакеты решения 2-х и 3-х мерных задач гравиметрии (ADG-2, ADG-3) [10, 11] и с А.И. Дмитриевым – решение прямых обратных двумерных задач магнитометрии (АДМ-2) [10]. В основу положена слоисто-блочная модель среды. Каждый слой разбивается на большое число одинаковых по горизонтальным размерам параллелепипедов. Неизвестными являются плотности или магнитные восприимчивости в каждом блоке или границы раздела слоев (контактная задача). В трехмерной гравиметрической задаче можно решать системы уравнений до $10^4 - 5 \cdot 10^4$ неизвестных. Именно на этот уровень В.Н.Страхов [15] планирует вывести разработки XXI века в рамках новой парадигмы. Причем такая возможность нами была достигнута в начале 90-х годов, когда мы работали на РС-286. Компьютер такую задачу считал 10-12 часов. Сейчас на Pentium Pro она пролетает за минуты. При современных возможностях компьютеров мы можем решать системы уравнений с числом неизвестных в 10^5 и более. За счет чего? Напомню возможности адаптивного метода. В нем нет необходимости (в нелинейных это и не нужно) создавать, хранить и обращаться громадные матрицы. В методе уточнения всех неизвестных производится в каждом очередном уравнении. Для обеспечения сходимости уравнения системы прогоняются многократно, это и обеспечивает сходимость к решению, ближайшему к априорно заданному. Какую априорную модель задает геофизик – это его дело. Он лучше знает модель, с которой работает и лучше понимает задачу, которую решает. Наше дело дать ему инструмент и научить его, как им пользоваться.

Методы и пакеты прошли опробование на модельных и реальных данных и используются в производственном режиме. В этих задачах есть свои трудности: учет краевых эффектов, учета фоновой составляющей и т.д. Но при правильной постановке все они решаются. Интересным и многообещающим является магнитометрический метод, который с большой точностью позволяет проводить наблюдения на разных высотах. В этом случае правильное решение трехмерных задач по данным полученных на разных уровнях позволяет построить модели пространственного распределения намагниченных пород (траппов, магнетитов и т.д.) с учетом априорной информации, полученной другими методами (сеймики, электроразведки, гравиметрии и ГИС). Если бы магниторазведчики, наряду с абсолютным значением, научились бы с такой же точностью регистрировать и его направление или его компоненты по осям X, Y, Z, то возможности метода увеличились бы значительно.

И тут самое время коснуться проблемы комплексной интерпретации. В моем представлении проблема сводится к построению модели, удовлетворяющей всем данным, полученным различными геофизическими методами (в т.ч. ГИС). Сторонники сейсмического метода, занимающиеся обработкой данных, полученных в осадочных бассейнах, могут спросить: а что же нового может дать гравика и магнитка сейсмикам? Мой ответ: главное – обогатить модель, позволяя понять эволюцию изучаемого участка земной коры. Иногда может указать на возможные участки разуплотнения, связанные как с тектоникой, так и газификацией пород. При интерпретации сейсмических данных полезно делать попытку определения параметров ВЧР по высокочастотным компонентам гравиметрического поля. Конечно же, для этого необходимы наблюдения, полученные на тех же пунктах. Похоже, на региональных профилях такие наблюдения ведутся. Но для того, чтобы делать такой переход, нужен инструмент, позволяющий получать необходимую для сейсмиков информацию. Именно для этой цели во всех разработках мы пытаемся проложить мостик от одного метода к другому. Так в силу необходимости мы вынуждены использовать данные ГИС как для нахождения формы сигнала, при решении обратной динамической задачи, так и для увязки. При решении гравиметрических задач мы переходим к оценке нулевых времен, скоростей и статических поправок, используя линейную зависимость между

скоростью и плотностью. Параметры линейной регрессии (для каждого слоя) являются входными данными. При решении обратных задач магнитометрии попутно рассчитываем аномалии гравитационного поля. Таким образом имеются все возможности для создания системы комплексной интерпретации, базирующейся на едином подходе к созданию программ или пакетов решения прямых и обратных задач.

Он включает следующие этапы :

- 1) Создание математической модели, необходимой для решения прямой задачи.
- 2) Создание алгоритма решения обратной задачи на основе адаптивного метода решения алгебраических (линейных и нелинейных) систем уравнений.
- 3) Опробование на модельных и на реальных данных.

Как правило, на этом этапе удастся выявить правильность математической модели, т.е, адекватность модели физической.

Для нас вопроса необходимости математической модели и необходимости использования методов решения систем алгебраических уравнений не стоит. Однозначно необходима адекватная математическая модель и устойчивый, не накапливающий ошибок метод решения систем уравнений. Но для практического геофизика наш или другой метод ничего не значит, если он не воплощен в удобный пакет программ и даже более в систему обработки.

Такие системы создают возможность организации баз данных удобного поиска и выбора любых данных. Но одно из главных требований это требования к графике, позволяющей визуализировать как основные, так и промежуточные результаты. Создание таких пакетов, их обкатка, доведение до удобного инструмента дело трудоемкое и поэтому затраты труда на создание математической части (при известном алгоритме) составляет значительно меньшую долю, чем все остальное (особенно графика). При такой постановке вопроса можно понять О.К.Кондратьева, когда он говорит о меньшей значимости математики.

Но, с другой стороны, для того, чтобы создать и исследовать новую математическую модель и исследовать ее адекватность физической необходимы большие затраты времени квалифицированных специалистов. После того как математическая модель будет получена, далее следует технология, для получения метода и пакета решения обратной задачи, о которой было сказано выше.

Я не берпу на себя смелость утверждать, что все обратные задачи надо решать с использованием алаптивного метода. Но те задачи, за которые мы брались, удавалось доводить до работающих методов, которые позволяют геофизику решать обратные геолого-геофизические задачи с учетом имеющейся у него информации.

Я признателен всем, кто помогал мне на этом нелегком, но интересном пути поиска, и тем, кто был оппонентом. И тех, и других было так много, что одно перечисление имен заняло бы целую страницу. Но если они прочтут эти строки, то поймут, что и они не забыты и примут мою благодарность. Особенно я благодарен С.В.Гольдину, который на всех этапах моей деятельности геофизика и стимулировал, и оппонировал и оказывал помощь.

Каждый из нас занят своим, необходимым для всех, делом. Степень необходимости будет определяться конкретным вкладом, не только решением задач, созданием программ и математических моделей и методов, опытом, но и анализом направлений, а также и идеями. А их в рамках дискуссии было высказано немало.

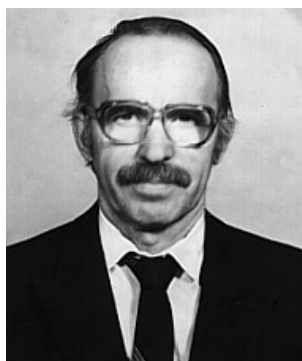
Я благодарен участникам дискуссии за то, что они спровоцировали меня на написание этой статьи и надеюсь, что она окажется кому-то полезной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гольдин С.В., 2000, Исповедь геофизика-математика: Геофизика, **6**, 3-11.
- 2 Страхов В.Н., 2000, В чем причина взаимоотношений геофизики и математики: Геофизика, **3**, с. 39-47.
- 3 Кондратьев О.К., 2000, Суть наших разногласий: Геофизика, **3**, 48-51.
- 4 Кочнев В.А., 1983, Адаптивное прослеживание отраженных волн и оценка их параметров по данным многократных систем наблюдений: Геология и геофизика **2**, 95-103.

- 5 Кочнев В.А. , Антоненко А.В. 1983 Рекурсивное уточнение параметров рекурсивной модели среды по годографам преломленных волн. Проблемы нефти и газа Тюмени. Тюмень, вып. 60, 59-62.
- 6 Кочнев В.А. , Пивоварова Н.Б., Тушко Т.А., 1984 Исследование адаптивного метода решения обратной задачи сейсмологии: Препринт №19 ВЦ СО АН СССР (г. Красноярск).
- 7 Кочнев В.А. 1987, Адаптивный метод решения некоторых обратных задач сейсморазведки: Сб. «Численные методы геофизики», Новосибирск, 55-61.
- 8 Кочнев В.А., 1988, Адаптивные методы интерпретации сейсмических данных: Н., Наука.
- 9 Кочнев В.А., Иванькина И.В., 1989 Исследование адаптивного подхода к задаче деконволюции: Геология и геофизика, **11**, 128-135.
- 10 Кочнев В.А., 1993, Адаптивный метод решения обратных задач геофизики: Учебное пособие. Красноярский Госуниверситет, ВЦ СО РАН.
- 11 Кочнев В.А., Хвостенко В.И., 1996, Адаптивный метод решения обратных задач гравиметрии: Геология и геофизика, **7**, 120-129.
- 12 Кочнев В.А., Гоз И.В., Поляков В.С., 1996, Технология решения обратной динамической задачи по данным метода отраженных волн. Тр.сем. «Обратные задачи геофизики», Н, 118-121.
- 13 Бехтерев И.С., Кочнев В.А., Поляков В.С., Гоз И.В. Решение навигационной задачи проводки свайн по данным ВСП ПБ: Геофизика, **5**, 2000, 16-20.
- 14 Кочнев В.А., 1997, Адаптивный метод решения систем уравнений в обратных задачах геофизики. Тр.Сибирской конф.по прикладной и индустриальной математике, посв.пам.Л.В.Канторовича. Н., 129-137.
- 15 Страхов В.Н., 1998, Что делать? (о развитии гравиметрии и магнитометрии в России в начале XXI века).М, ОИФЗ РАН.

Об авторе.



Владимир Алексеевич Кочнев — в.н.с. Института вычислительного моделирования СО РАН, доктор технических наук. В 1958 г. закончил геофизический факультет Свердловского горного института им.В.В.Вахрушева. Участвовал в открытии 7 месторождений в Западной Сибири (Томская и Тюменская обл.) Область научной деятельности: разработка и исследование новых методов решения прямых и обратных задач геофизики, в первую очередь сейсморазведки. Автор 85 работ, в т.ч. 2х монографий.