

## ЧТО МОГУТ ДАТЬ ГРАВИМЕТРИЯ И МАГНИТОМЕТРИЯ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

### *Using gravity and magnetic data in seismic data interpretation*

*Кочнев В.А., Гоз И.В. — Институт вычислительного моделирования СО РАН*

#### **Реферат**

В статье рассматриваются два варианта использования гравиметрических данных: для расчета статических поправок и для построения модели, удовлетворяющей данным сейсморазведки, гравиметрии и магнитометрии. В качестве примера используются данные регионального профиля Алтай-Северная Земля.

#### **Abstract**

The article deals with two options for the use of gravity data: for calculation of the static correction and for building a model that corresponds to seismic, gravity and magnetometry data. As an example, we are using data from regional profile Altai — Severnaya Zemlya.

#### **Введение**

Чем больше вникаешь в проблему совместной интерпретации данных сейсморазведки с данными потенциальных полей, тем больше убеждаешься, в том, что в этом направлении непочатый край возможностей, которые позволяют правильно построить не только глубинную модель среды, но и модель ВЧР, а, следовательно, и статические поправки.

На примере 167-км участка профиля приведем некоторые наиболее интересные результаты. Рассмотрим три варианта решения задач использования гравиметрии для расчета статических поправок и уточнения модели по магнитным и гравиметрическим данным.

#### **Эксперимент по определению статических поправок**

Обработка данных сейсморазведки на территории Восточной Сибири является серьезной задачей. Возможность использования гравиметрических данных для обработки сейсмики интересовала многих геофизиков [3-5]. В указанных работах отыскивалась корреляционная зависимость локального гравитационного поля с распределением эффективных скоростей по площади с последующей корректировкой скоростей с использованием гравиметрических наблюдений.

В западной части Восточной Сибири мощность ВЧР достигает 800-1500 м. Кроме низкоскоростных рыхлых отложений внутри толщи ВЧР имеются высокоскоростные долеритовые траппы мощностью до 1200 м. Скорость продольных волн в трапах колеблется от 5500 до 6500 м/с, а плотность от 2.9 до 3.1 г/см<sup>3</sup>.

Первый эксперимент по расчету параметров ВЧР и статических поправок с использованием технологии ADG-3D был проведен на одном из участков регионального профиля, пересекающего Тунгусскую синеклизы.

Было сделано предположение, что гравитационное поле по профилю вызвано слоем ВЧР. Гравитационное поле и отметки рельефа были заданы с шагом 25 м. В конкретном случае модель представлена одним слоем, подошва которого располагается на отметке 800 м, а кровля ограничена поверхностью рельефа. Приняв первоначальную плотность модели 2.67 г/см<sup>3</sup> и используя пакет ADG-3D, решим обратную задачу.

С заданными условиями обратная задача сводится к решению системы с 7010 уравнениями с 7010 неизвестными. Теоретически задача имеет единственное решение. Сходимость решения характеризуется следующими среднеквадратическими невязками (разностями между исходным и модельным полем): 0.96; 0.39; 0.15 мГал. Время счета составило 30 мин. Исходная и модельная кривые на рисунке не отличаются, кривая разности близка к нулю (рис.1а). На рис.1б видим плотностной разрез, в котором плотности изменяются от 2.48 до 3.04 г/см<sup>3</sup>. Пределы вполне правдоподобны.

В пакете предусмотрена возможность расчета интервальных скоростей в каждом слое и времен пробега отраженных упругих волн до каждой границы, а также средних скоростей. Для расчета интервальных скоростей для каждого k-го слоя задаются коэффициенты линейной зависимости

$$V_{ijk} = V_k + b_k (\rho_{ijk} - f_k),$$

где  $V_{ijk}$  – скорость в ij-ом блоке k-го слоя,  $V_k$  – интервальная скорость, соответствующая  $f_k$  – фоновой плотности,  $b_k$  – коэффициенты связи плотности и скорости,  $\rho_{ijk}$  – плотность в ij-ом блоке k-го слоя.

В каждом регионе известны такие зависимости, полученные по экспериментальным данным. В данных экспериментах приняты следующие константы:  $V_k=5000$  м/с;  $b_k=4000$  (м/с)/(г/см<sup>3</sup>);  $f_k=2.67$  г/см<sup>3</sup> – плотность, совпадающая с плотностью верхнего слоя, принятой для расчета аномальных значений dg. Используя указанные линейные зависимости, получим интервальные скорости и времена пробега отраженных волн от нижней границы слоя.

На рис.1в приведено распределение интервальных скоростей по профилю. Положение нижней границы соответствует времени пробега отраженной волны от этой границы, то есть этот разрез можно назвать временным разрезом интервальных скоростей. На разрезе видно, что скорости изменяются в пределах от 4200 до 6400 м/с, времена прихода отраженной волны от нижней границы меняются от 320 до 560 мс. Пределы скоростей и времен вполне правдоподобны. Эта скоростная модель ВЧР может быть использована для суммирования в процессе получения разрезов ОГТ. Но более простым и привычным для обработки является вычисление и ввод статических поправок, исключающих влияние неоднородностей ВЧР. В технологии ADG-3D предусмотрено вычисление поправок, имитирующих замещение неоднородного слоя на слой со скоростью, соответствующей фоновой скорости. В данном

случае весь разрез от поверхности будет замещен слоем со скоростью 5000 м/с. Статические поправки вычисляются по формуле

$$\tau_{ijk} = h_{ijk} / V_{ijk} - h_{ijk} / V_k ,$$

где  $h_{ijk}$  – мощность  $ij$ -го блока в  $k$ -ом слое.

На рис.2 верхний график – кривая  $dg$ , а последующие три – поправки, полученные разными методами пересчета кривых  $dg$  в кривые статических поправок [9]. Как видно, все они гладкие и мало отличаются. Нижний график – поправки, вычисленные по первым вступлениям рефрактированных волн. Предпоследний вычислен с помощью технологии ADG-3D. Видны высокочастотные компоненты, которые наиболее достоверны. Низкочастотные компоненты могут быть вызваны глубинными неоднородностями. Этот вопрос в данной работе детально рассматриваться не будет.

На рис. 3,4 приведены два временных разреза. Один из них получен по стандартной строго сейсмической технологии, а второй – с использованием статических поправок, полученных с использованием технологии ADG-3D. Специалисты видят в этом разрезе существенные преимущества. На нем с большей отчетливостью выделяются особенности глубокой части разреза, где и находятся основные объекты, перспективные на обнаружение углеводородов.

### **Уточнение глубинной модели по магнитным данным**

Построение модели глубинной части начнем с интерпретации данных магнитометрии. Следует заметить, что данные магнитометрии традиционно использовались для качественной интерпретации. Иногда эти данные использовались для определения верхней кромки намагничивающих объектов. Построение моделей намагниченных объектов используется в рудной геофизике. Как правило, в 2D-варианте. Наша технология использует пакет ADM-3D и позволяет решать как 2D, так и 3D-задачи по многоуровневым наблюдениям. Некоторые результаты на эту тему опубликованы в работах [6-9].

На региональном профиле проведена трехуровневая магнитная съемка с высотами облета 100, 750 и 2000 м. Для интерпретации были использованы первые два уровня.

Кривые видим на рис.5а. Пределы изменения магнитного поля — от -240 до 640 нТл на уровне 1 и с меньшей амплитудой на более высоких уровнях.

Ближайшая скважина, на которой были вскрыты два траппа, находится в 10 км от начала профиля. Один трапп мощностью около 80 м, другой около 200 м. Ранее проведенными исследованиями [1] было установлено, что близко расположенные траппы можно рассматривать, как единый трапп с мощностью обеих траппов. На рис.5б показано начальное приближение обобщенной модели траппа. Решая контактную задачу (то есть определяя удовлетворяющую исходным магнитным данным конфигурацию границ раздела слоев при заданных магнитных восприимчивостях), удалось получить конфигурацию траппа (рис.5в), которая дает модельные кривые, на обоих уровнях наблюдения практически совпадающие с наблюдеными. Как видно, мощность обобщенного траппа меняется от 200 до 1400 м. Следует иметь в виду, что

эффективная магнитная восприимчивость (включающая и остаточную намагниченность) принята равной  $5000 \cdot 10^{-5}$  ед.СИ. Эта величина была взята по результатам анализа траппов на Ванаварской и Юрубченской площадях, которые приведены в работе [1] по результатам измерений, сделанных под руководством Б.Долгова.

Если реальная эффективная восприимчивость будет в два раза больше, то разность мощности уменьшится приблизительно в два раза, то есть пределы мощности будут от 200 до 800 м.

Полученная модель была использована для построения исходной модели, удовлетворяющей данным сейсморазведки, гравиметрии и магнитометрии (рис.6а), которая в дальнейшем уточняется по данным гравиметрии.

### **Уточнение модели по гравиметрическим данным**

Основные особенности модели:

1. Общее погружение к северу, к центру Тунгусской синеклизы.
2. Увеличение мощности траппов.
3. Наличие антиклинального выступа в глубокой части с плотностью около  $2.67 \text{ г}/\text{см}^3$ .
4. В конце профиля в глубинной части введем блок с плотностью, равной  $2.9 \text{ г}/\text{см}^3$ .

График исходного и модельного полей приведен на рис.6б. как видно, основные особенности поля модельная кривая повторяет. Решив обратную задачу, получим практически полное совпадение графиков.

Обратная задача в данном случае сводилась к уточнению плотностей во всех 7 слоях. В каждом из них имеется 1756 блоков. Необходимо уточнить  $1756 \times 7 = 12292$  значений плотностей по 1756 уравнениям. Задача, естественно, имеет множество решений. Используя адаптивный метод решения систем, заложенный в пакетах ADG и ADM, мы находим решение, ближайшее к априорно заданному. В алгоритме заложена возможность влиять на степень уточнения значений параметров и групп параметров. Например, мы знаем, что в большей степени необходимо уточнить параметры в верхнем или нижнем слое. Тогда мы задаем большие значения погрешностей, соответствующие этим слоям. В данной задаче погрешности для всех значений уточняемых параметров, то есть плотностей, принятые равными  $0.1 \text{ г}/\text{см}^3$ . Погрешности наблюденных значений приняты равными 1 мГал. Задав 5 итераций, получим следующие среднеквадратические невязки: 1.78; 1.43; 0.16; 0.96; 0.79 мГал.

Как видно, процесс уточнения шел практически линейно, и при большем числе итераций можно получить невязки, стремящиеся к 0. Но в данном случае мы, используя возможности технологии, переведем результативные плотности в исходные и повторим счет. В результате получим следующие невязки: 0.55; 0.33; 0.24; 0.20; 0.17 мГал.

На рис. 6в видим исходный, модельный графики  $\Delta g$  и их разность, которая не превышает 0.5 мГал.

Используя возможности технологии, результативную плотностную модель проиллюстрируем не в глубинном, а во временном масштабе (рис. 6г). Как

видно, изменения плотности произошли в основном в 1 и 2 слое. плотности в полученной модели разреза меняются от 1.99 до 2.96 г/см<sup>3</sup>. На разрезе видим изображение псевдоскважин,. Они позволяют показать времена отраженных горизонтов, которые удалось проследить на предварительном временном разрезе. На первых 4 псевдоскважинах три горизонта – глубокий, горизонт Б и приуроченный к подошве траппа. На последующих «скважинах» время отражения глубокого горизонта не показано, так как оно не прокоррелировано («скважины» как бы не добурены), а горизонты Б и трапповый показаны. Анализируя такой разрез, можно увидеть, что сейсмические горизонты в основном хорошо ложатся на границы обобщенной модели. В результате можно сделать вывод, что полученная модель полностью удовлетворяет гравиметрическим данным. Она учитывает магнитные данные и сейсмические данные. Кроме того, она учитывает и данные бурения скважин, расположенных в 10 км от начала профиля. По ним в первом приближении были заданы плотностной разрез, в том числе положение и мощность траппов. При наличии реальных скважинных данных на профиле можно учитывать их и включать в разрез как в глубинном, так и во временном масштабе.

Следует заметить, что статья не претендует на завершение затронутых в ней тем. Авторам хотелось показать новые возможности разработанных ими технологий. Применить же эти инструкции наилучшим образом могут геофизики, знающие особенности моделей своего региона.

## **Заключение**

В статье показаны два варианта использования гравиметрических данных: для расчета статических поправок путем решения системы алгебраических уравнений с использованием пакета ADG-3D и для построения модели, удовлетворяющей данным сейсморазведки, гравиметрии и магнитометрии. В результате удастся получить более читаемый разрез. Недостатком этого пути является то, что в некоторых случаях в гравитационном поле имеем не только влияние поверхностных, но и глубинных источников. Используя магнитометрию и сейсмические наблюдения, мы можем построить первое приближение глубинной модели, а затем уточнить модель с использованием гравиметрии. Технология ADGM-3D позволяет уточнять модель, используя сейсмические и гравитационные данные и наглядно показывать результаты. Это проиллюстрировано на 167 км участке регионального профиля.

Авторы благодарны руководству Красноярскгеофизики за разрешение опубликовать статью и ее сотрудникам Карху Э.А. и Кульчинскому Ю.В., с которыми вместе выполнена первая часть работы, частично представленная в двух совместных докладах в Москве [10-11] и Красноярске.

## **О пакете ADM-3D**

Пакет ADM-3D предназначен для решения прямых и обратных задач магнитометрии и гравиметрии. Тип модели: слоисто-блочная. Число слоев, профилей, точек на профиле и число уровней (высот) наблюдения не ограничено. Все это и время счета определяется возможностями ПЭВМ. Для

устойчивого и надежного решения, учитывающего априорную информацию, используется адаптивный метод. Предполагаются известными начальные приближения параметров модели среды, оценки их погрешностей, а также погрешностей наблюденных данных, по которым решается обратная задача. Задача решается итерационно-статистическим (адаптивным) методом, в котором уточнение всех неизвестных производится рекуррентно от уравнения к уравнению по невязке между фактическими и рассчитанными по модели значениями аномального магнитного поля.

## **Литература**

1. Кочнев В.А. Адаптивные методы решения обратных задач геофизики. - ВЦ СО РАН, Красноярск, учебное пособие, 1993.
2. Кочнев В.А., Хвостенко В.И. Адаптивный метод решения обратных задач гравиметрии. - Геология и геофизика, №7, 1996, с.120-129.
3. Захарова Г.А., Колесов С.В., Потапов О.А., Иноzemцев А.Н. Определение среднечастотной компоненты остаточных статических сдвигов сигналов по фрагментам отраженных волн. Геофизика, 1, 2000, с.19-24
4. Музыченко Б.И., Ефимов А.С. Метод динамического анализа вертикального годографа – эффективный способ изучения строения верхней части разреза при проведении нефтегазопоисковых сейсморазведочных работ в траппонасыщенных районах Сибирской платформы. Сб.тр.научно-практ.конф. «Пути повышения эффективности геологоразведочных работ на нефть и газ в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия)», Н, 2006.
5. Покровский Н.С. Прогнозирование латеральных изменения скорости по результатам комплексной интерпретации материалов гравиразведки и сейсморазведки. Разведка и промысловая геофизика, 10, 1987, с 20-25.
6. Kochnev V.A., Vasilev D.V., Sidorov V.Y. The technique of solving 3-D gravity problems. – SEG International Exposition and Annual Meeting, Salt Lake City, 2002.
7. Кочнев В.А., Гоз И.В., 2006. Нераскрытые возможности магнитометрии. - Геофизика, №6, с.51-55
8. Kochnev V.A., Goz I.V. The technology of forward and inverse modeling for 3D and 2D magnetic data. // Exp. Abstr. of International Geophysical Conference & Exhibition, Moscow 2003.
9. Кочнев В.А., Гоз И.В. Проблемы постановки и решения прямых и обратных задач магнитометрии. Мат. 34-й сессии Межд.сем.им.Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей.», Москва, 29 января-3 февраля 2007 г. с 146-150
10. Кочнев В.А., Гоз И.В., Карху Э.А., Кульчинский Ю.В. Опыт расчета статических поправок в условиях Тунгусской синеклизы с использованием пакета ADG-3D. Мат. 34-й сессии Межд.сем.им.Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики

- геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей.», Москва, 29 января-3 февраля 2007 г., с.150-153
- 11.Кочнев В.А., Карху Э.А., Кульчинский Ю.В., Ключко В.П. Возможности прогноза геологического разреза на основе использования адаптивных методов в геофизике. Мат. научн.-практ. конф. «Геология и минеральные сырьевые ресурсы центральной Сибири и прилегающих территорий», Красноярск, 10-12 апреля 2007 г. Изд. ОАО «Красгегольсъемка», с. 321-325.

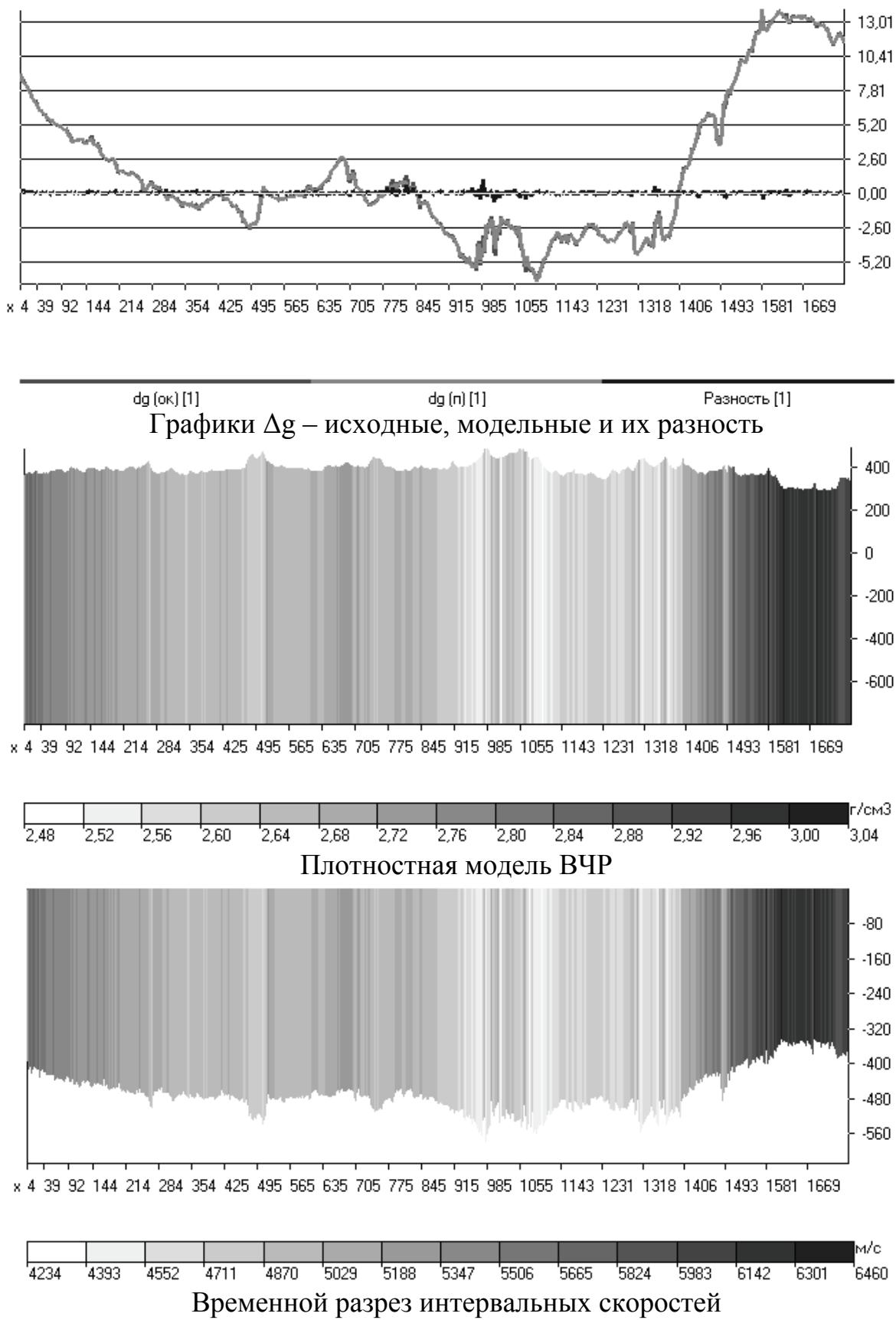


Рис.1

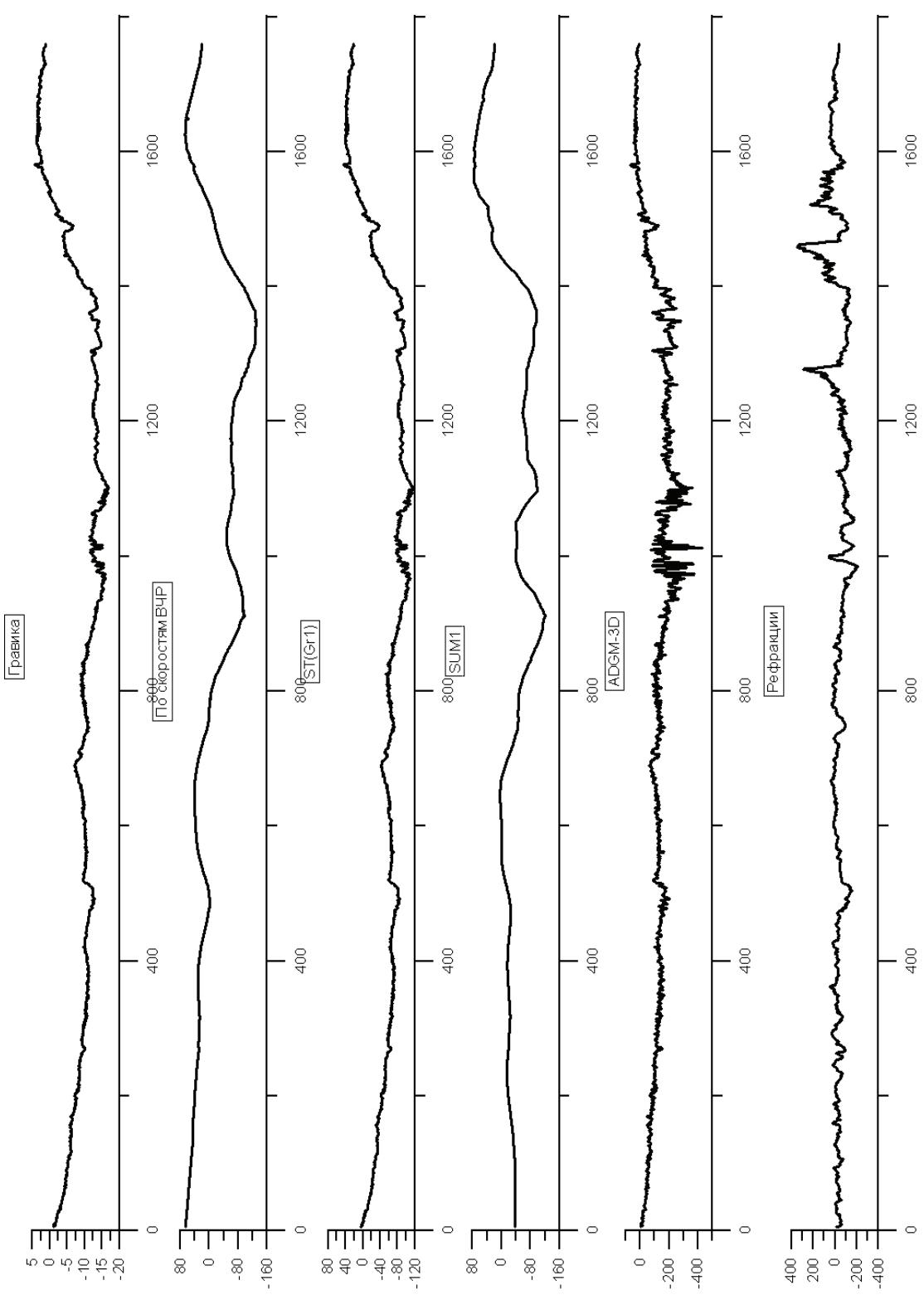


Рис.2 Исходная  $\Delta g$  и графики статических поправок: кривые 2-4 поправки определены с использованием преобразования  $\Delta g$ ; 5 – с использованием технологий ADG-3D и 6 – по рефрационным сейсмическим волнам

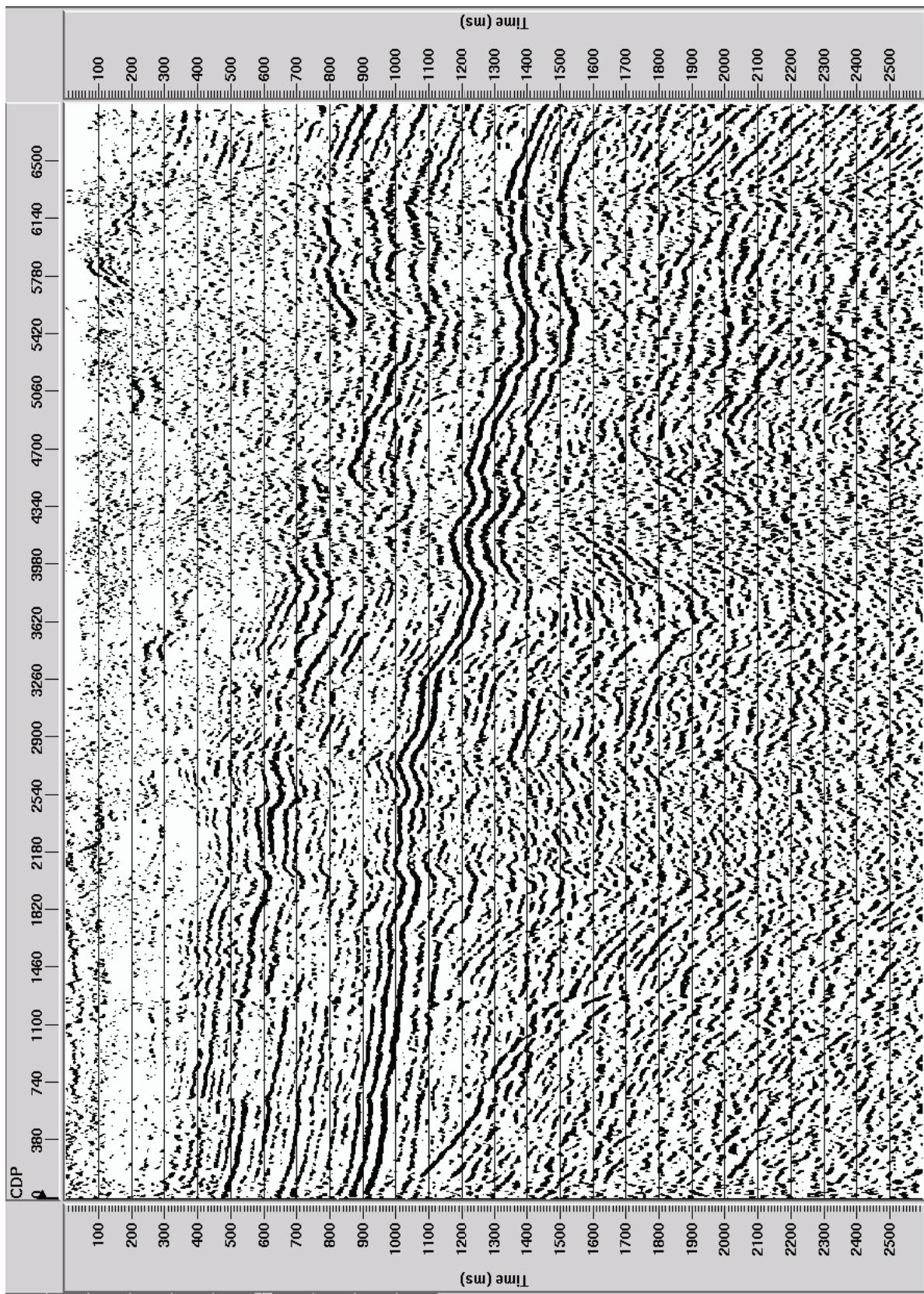


Рис.3 Разрез со статикой стандартного варианта обработки

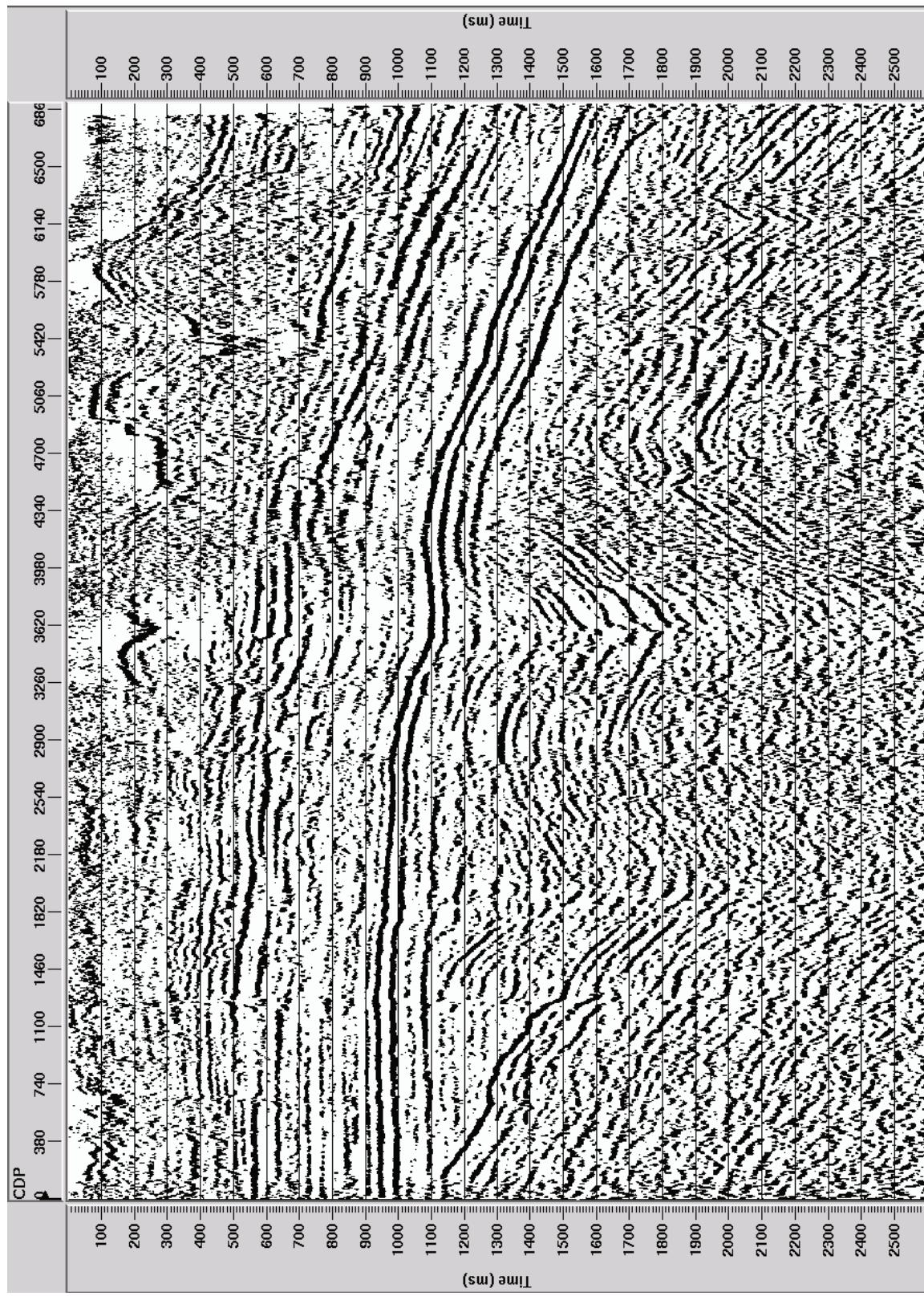


Рис. 4 Разрез со статикой, рассчитанной с использованием технологии ADG-3

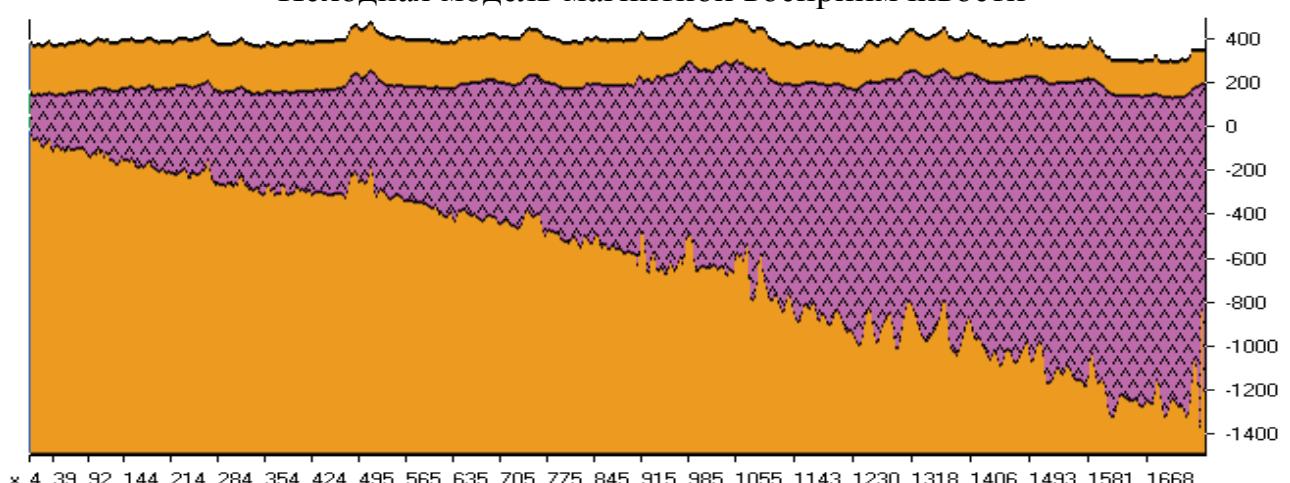
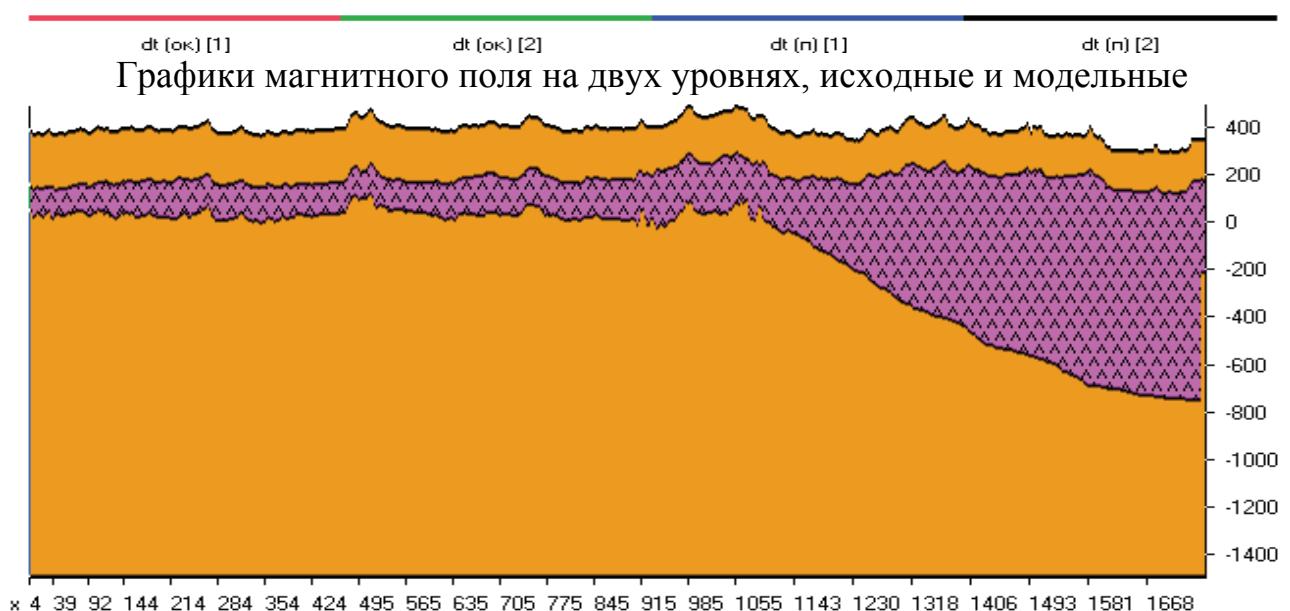
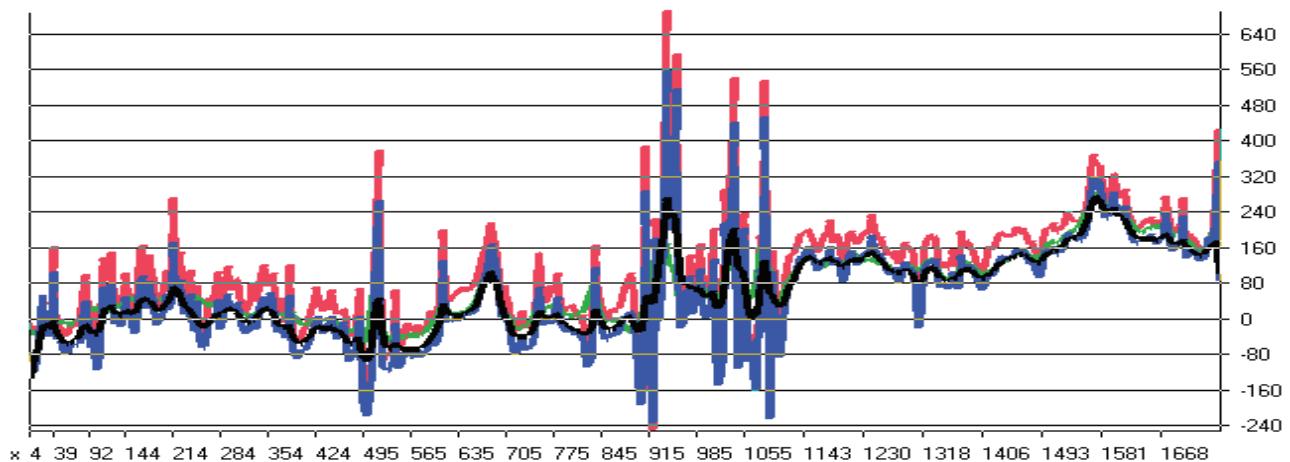


Рис.5

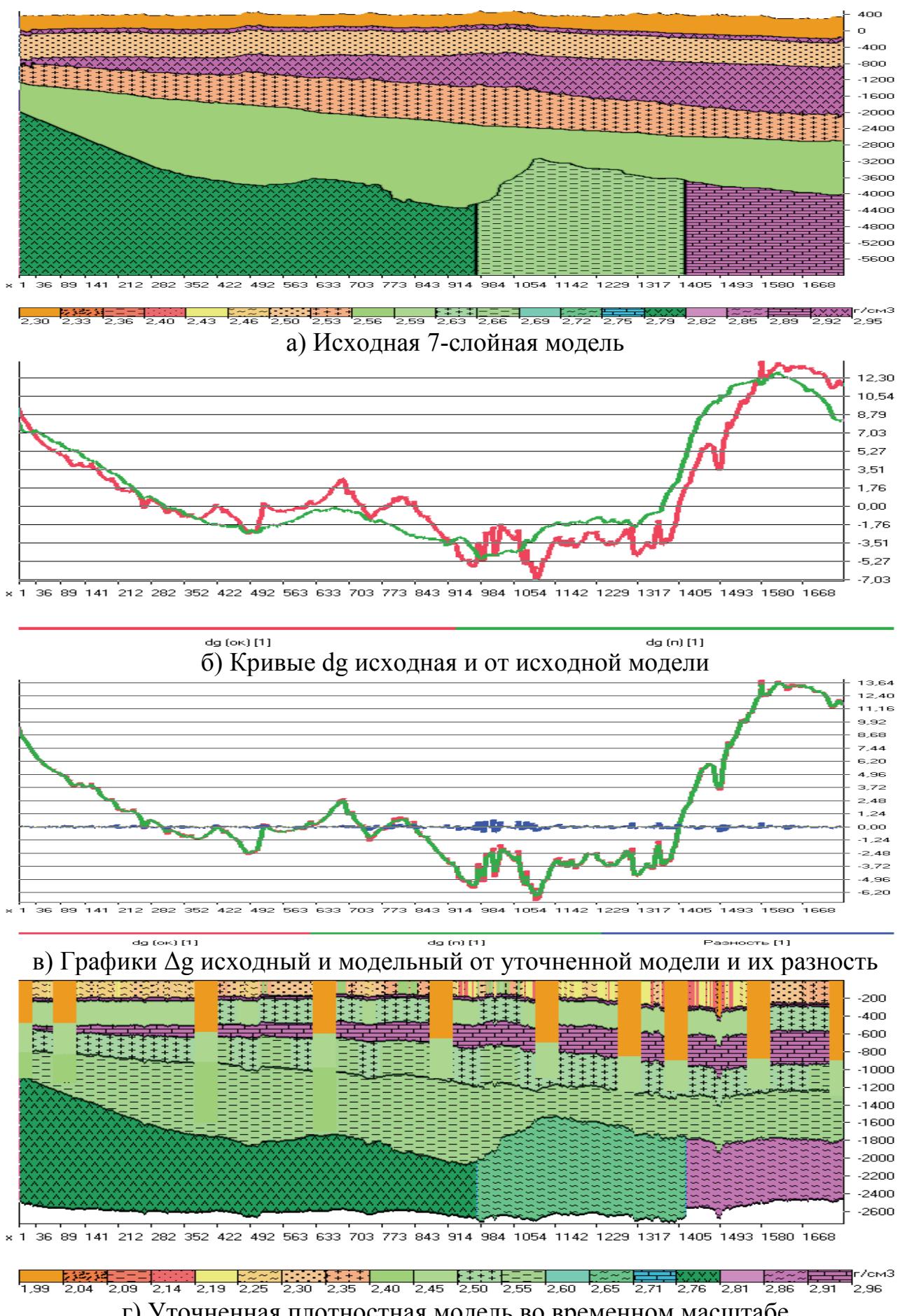
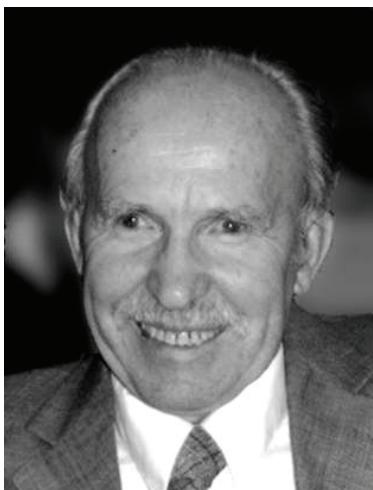


Рис.6

*Об авторах*

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 более 100 работ, в т. ч. 2х монографий.



Илья Владимирович Гоз — инженер-программист Института вычислительного моделирования СО РАН. В 1993 г. закончил физический факультет Красноярского государственного университета. Область научных интересов: методы решения прямых и обратных задач.