

наблюдаемые здесь небольшие зоны безрудных скарнов на контакте их с магнетитовыми рудами, но эти растворы уже не несли рудной нагрузки.

Изучение месторождения Тхак Кхе показало, что по основным признакам — строению и минеральному составу зон — это типичное ме-

сторожение формации магнезиальных скарнов. В то же время здесь устанавливается и целый ряд черт, таких как активная роль рудоподводящих разломов, формирование залежи в ослабленной зоне, отложение рудного вещества в цементе брекчий и других, характерных для гидротермальных месторождений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Довжиков А. Е. и др. Геология северного Вьетнама. Ханой, 1965.
2. Шабьнин Л. И. О фассайтовом характере клинопироксена магнезиальных скарнов. — ДАН СССР, 1969, т. 187, № 6.

3. Шабьнин Л. И. Магнезиально-скарновые железорудные месторождения. М.: Недра, 1978.

Главное геологическое  
управление СРВ  
Ханой

Поступила в редакцию  
4 декабря 1981 г.

УДК 550.834 : 51(571.64)

В. И. Исаев

## ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК НА ПРИМЕРЕ ПРОФИЛЯ СРЕДНИЕ ЛАНГАРЫ — МУХТО (Северный Сахалин)

Разработана принципиальная схема решения обратной двумерной задачи гравиметрии в линейной постановке. Задача сводится к минимизации сглаживающего параметрического функционала А. Н. Тихонова. Для минимизации принят метод сопряженных градиентов на случай линейных ограничений на неизвестные. Региональный фон включен в модель алгебраическим по-

линомом. Аппроксимация плотностного разреза выполняется однородными горизонтальными призмами с сечением в виде трапеции.

В качестве примера выполнена комплексная количественная интерпретация материалов реального разреза с ошибкой  $\pm 0,03-0,04$  г/см<sup>3</sup>.

Количественная интерпретация материалов гравиметрических съемок предполагает, что численный метод обеспечивает геолого-геофизическую и математическую эффективность решения поставленной задачи. Этим требованиям отвечает метод сопряженных градиентов, практические рекомендации по реализации которого изложены в монографии В. И. Старостенко [4]. Особенности реализации метода состоят в следующем:

1) Считается, что оператор  $A$ , описывающий геометрию разреза, задан точно, а наблюдения  $b$  — с погрешностью, т. е. минимизируется регуляризирующий функционал вида

$$f(x) = \|Ax - b\|^2 + \alpha_H \|x - x_0\|^2, \quad (1)$$

где  $\alpha_H$  — параметр регуляризации по А. Н. Тихонову.

2) Метод реализован на случай задачи с линейными ограничениями на неизвестные. Такая реализация позволяет достаточно просто осуществлять формализацию априорных геолого-геофизических сведений о разрезе и включать их в процесс поиска решения.

3) Региональный фон учитывается включением в модель алгебраического полинома, коэффициенты которого дополняют вектор неизвестных.

4) Принята простая форма аппроксимации плотностного разреза — однородная горизонтальная призма с сечением в виде трапеции [1, 4], что позволяет удобно аппроксимировать контактные поверхности при наличии вертикальных ступеней, решать структурные и рудные задачи. В предлагаемой статье, опираясь на вышеуказанный метод решения обратной задачи и особенности 1—4 его реализации, раз-

Основные принципы схемы состоят в следующем:

1. Устойчивость и требуемая точность решения обеспечивается на теоретической модели, которая по характеристикам наблюдаемого поля и плотностного разреза аналогична реальной модели.

2. Мера несовместимости модели допустима, т. е. модель адекватна реальным условиям.

3. Окончательное решение при заданном операторе  $A$  обеспечивает удовлетворительное положение вектора неизвестных по отношению к предельным ограничениям и выполнение критерия «невязки».

Невыполнение любого из принципов предполагает пересмотр характеристик плотностного разреза и наблюдаемого поля априорной модели. Реальная модель предварительно сводится к расчетной модели путем исключения из априорной плотностной модели областей краевого наращивания и их гравитационного эффекта из наблюдаемого поля. За вероятную ошибку окончательного решения принимается точность решения на теоретической модели. Последнее согласуется с идеей так называемого «квазиреального эксперимента» в системе обработки, типичной для широкого класса физических экспериментов [5].

В качестве примера действия принципиальной схемы в статье приводится опробование схемы и математического обеспечения (МО) на геолого-геофизическом разрезе вдоль профиля Средние Лангары — Мухто (рис. 2). Профиль в свое время был интерпретирован решением прямых задач (методом подбора) в Сахалинском ТГУ. Цель опробования — проверка пригодности МО и принципиальной схемы для решения обратной задачи в реальных условиях. При этом подразумевается, что заранее известен «ответ» задачи.

Кроме того, необходимо хотя бы в первом приближении соблюдать условие двумерности задачи. За «ответ» первого порядка приняты плотности по данным бурения скважин I и IA (см. рис. 2, B). За «ответ» второго порядка приняты плотности, полученные в результате подбора решением прямых задач. Условие двумерности задачи в первом приближении определено проложением профиля вкрест простирания аномалеобразующих объектов (см. рис. 2, B).

Предлагаемая схема реализует интерпретацию до физического уровня, т. е. решение обратной задачи по профилю Средние Лангары — Мухто выполняется до уровня плотностей.

Перейдем теперь к описанию этапов действия схемы (см. рис. 1).

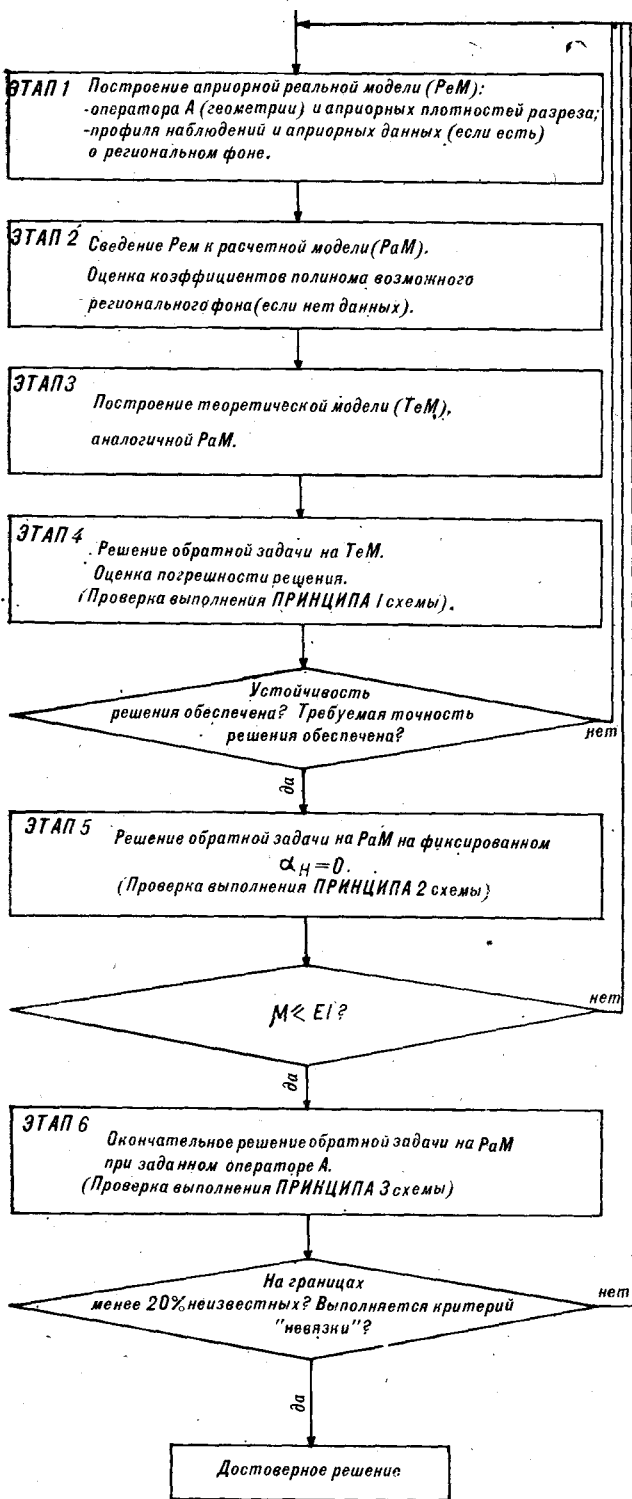


Рис. 1. Принципиальная схема решения обратной задачи.

работана принципиальная схема решения обратной задачи на ЭВМ (рис. 1) на примере реального геолого-геофизического разреза.

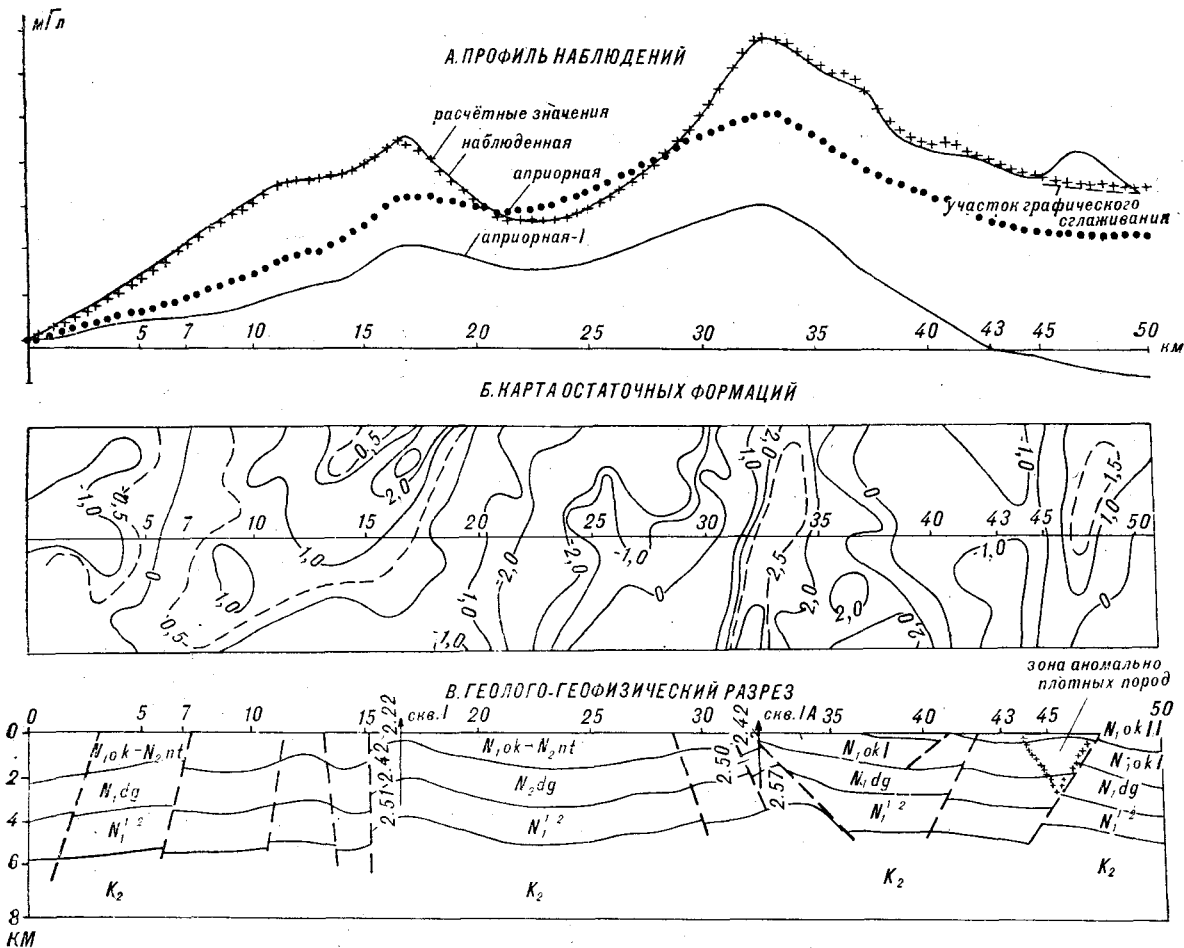


Рис. 2. К решению обратной задачи на профиле Средние Лангары — Мухто.

На геолого-геофизическом разрезе показаны скважины (номер, средние значения плотности горизонтов по результатам опробования).

### ЭТАП 1. ПОСТРОЕНИЕ АПРИОРНОЙ МОДЕЛИ

1) Геометрия плотностного разреза (рис. 3) задана на основании анализа материалов по нескольким сейсмическим профилям с использованием данных глубокого бурения. Априорные плотности и их возможные предельные значения взяты равными в пределах каждого слоя соответственно  $2,30 \pm 0,05$ ;  $2,35 \pm 0,10$ ;  $2,45 \pm 0,15$ ;  $2,55 \pm 0,15$ ;  $2,65 \pm 0,10$  г/см<sup>3</sup> [3].

2) Наблюденное поле (см. рис. 2, А) задано в 101 точке (по материалам наземной правиметрической съемки, проектная точность наблюдений  $\pm 0,20$  мГл [2]) с шагом 500 м. Локальный максимум в правой части профиля графически сглажен, так как аномалеобразующий объект из решения исключен. Априорных сведений о региональном фоне нет.

### ЭТАП 2. СВЕДЕНИЕ РЕАЛЬНОЙ МОДЕЛИ (РеМ) К РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ (РаМ). ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИНОМА ВОЗМОЖНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ФОНА

1) Наблюденная кривая приведена к уровню расчетных значений путем решения прямой задачи от априорного разреза РеМ (с краевым наращиванием) и

совмещением левых концов кривых (см. рис. 2, А, наблюдённая, априорная-1).

2) Осуществлена оценка коэффициента  $B1$  (наклонная составляющая возможного регионального фона):

$$B1 = 0,32 \text{ мГл/км.}$$

Полагая, что наклонная составляющая регионально-го фона может быть и больше, а может и вообще отсутствовать, окончательно принято

$$B1 = 0,25 \pm 0,25 \text{ мГл/км.}$$

3) РеМ сведена к РаМ путем решения прямой задачи от априорного разреза РеМ (учет только областей краевого наращивания на длину профиля) и вычитанием этого гравитационного эффекта из наблюдаемой кривой, приведенной к уровню расчетных значений (см. рис. 3 — наблюдённая РаМ).

4) Осуществлена оценка коэффициента  $B0$  (постоянная составляющая) возможного регионального фона, обусловленного погрешностью приведения наблюдаемой кривой к уровню расчетных значений.

$$B0 = 0 \pm 2,0 \text{ мГл.}$$

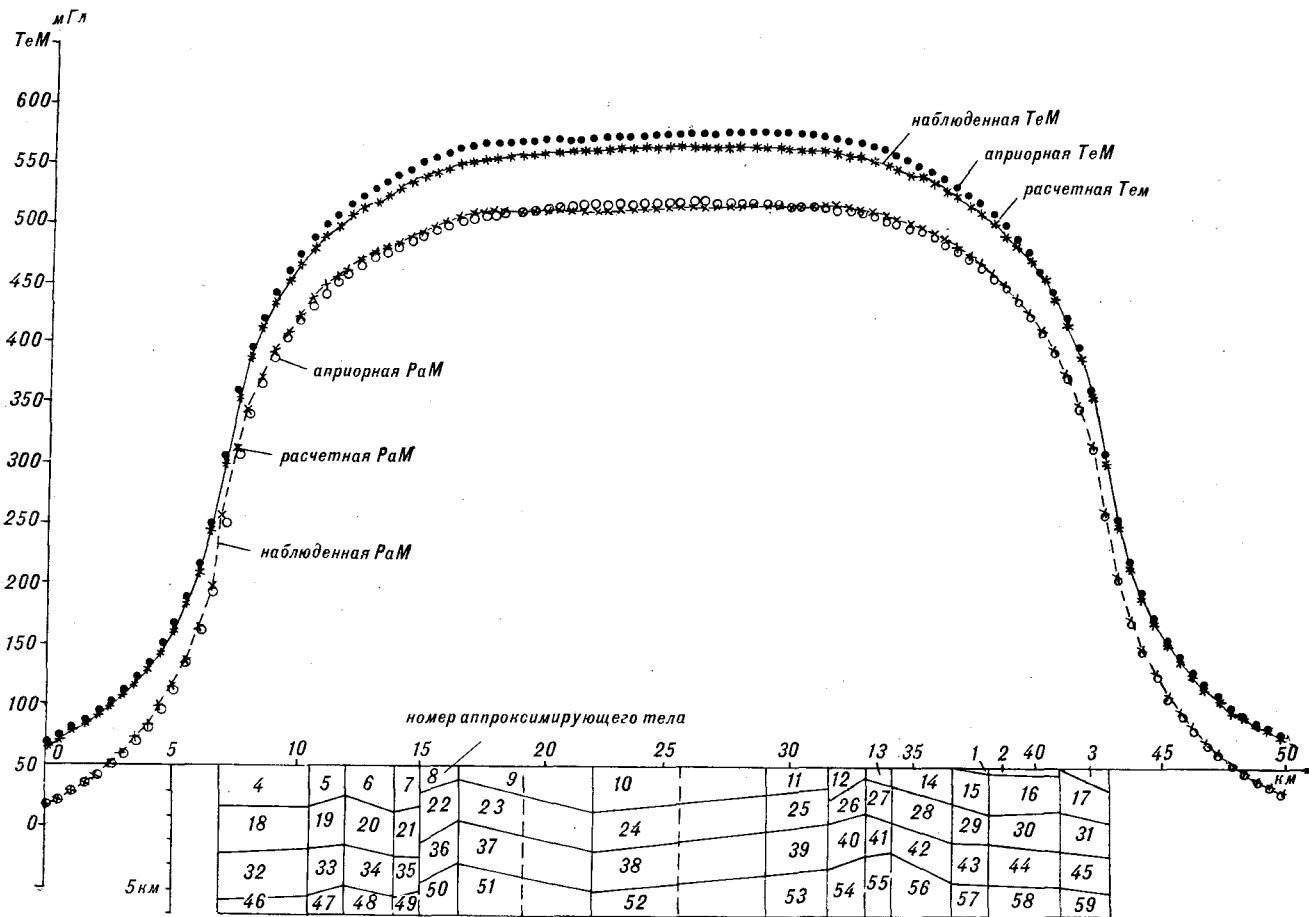


Рис. 3. К решению обратной задачи на теоретической модели (ТеМ) и расчетной модели (РаМ) профиля Средние Лангары — Мухто.

### ЭТАП 3. ПОСТРОЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ (ТеМ), АНАЛОГИЧНОЙ РаМ

### ЭТАП 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ НА ТеМ

1) Выполнена генерация «белого шума» — последовательности 101 числа с математическим ожиданием 0,00 мГл и среднеквадратическим (с. к.) отклонением, равным  $\pm 0,19$  мГл.

2) Выполнена генерация точных наблюдений путем решения прямой задачи от априорного плотностного разреза РаМ.

3) Получено наблюдаемое поле для ТеМ (см. рис. 3 — наблюдаемая ТеМ) путем сложения точных наблюдений, «белого шума» и числовой последовательности, имитирующей региональный фон ( $B_0=2,0$  мГл,  $B_1=0,20$  мГл/км).

4) Априорный плотностной разрез для ТеМ получен перестройкой (в плотностном отношении) априорного плотностного разреза РаМ. Плотности априорного плотностного разреза РаМ есть решение обратной задачи для ТеМ.

1) Решена обратная задача на ТеМ при начальном значении параметра регуляризации  $\alpha_n=1$  и точности вычисления градиента функционала [4]  $E=10^{-3}$ . С. к. приближение априорной кривой к наблюдаемой составляло  $\pm 9,16$  мГл. Выход на решение — по минимуму функционала.

Ошибки определения  $B_0$  и  $B_1$  соответственно 0,110 мГл и 0,002 мГл/км. Ошибки по плотностям  $\pm 0,037$  г/см<sup>3</sup>, максимальное отклонение от точного значения 0,10 г/см<sup>3</sup> (13-е тело).

На предельных ограничениях определялись плотности на четырех телах (1, 2, 3, 45, 59) (см. рис. 3). Сходимость по полю:  $\pm 0,16$  мГл.

2) Выполнено повторное решение обратной задачи на ТеМ при  $\alpha_n=1$ ,  $E=10$ . Выход на решение по достижению точности  $E$ . Результаты повторили предыдущее решение.

3) Если попытаться уравнивать правитационный эффект от каждого аппроксимирующего тела, возможно, точность решения возрастет? Выполнено дополнительное деление тел 9, 10, 23, 24, 37, 38, 51, 52 (см. рис. 3). В общем случае выполнение подобной операции предполагает возврат на этап 1.

Решена обратная задача на ТеМ (59+8 тел) при  $\alpha_n = 1$ ,  $E = 10^{-3}$ . Выход на решение — по минимуму функционала. Ошибки определения  $B_0$  и  $B_1$  соответственно 0,140 мГл и 0,002 мГл/км. Ошибки по плотностям  $\pm 0,041$  г/см<sup>3</sup>, максимальное отклонение от точного значения 0,10 г/см<sup>3</sup> (8-е и 13-е тела). На предельных ограничениях определены плотности трех тел (1, 45, 59). Сходимость по полю:  $\pm 0,16$  мГл.

Выводы: а) решения удовлетворяют условию устойчивости;

б) 1-й вариант решения предпочтительней;

в) алгоритм обеспечивает «автоматический останов» в окрестностях точки, соответствующей критерию «невязки», и тем самым исключает необходимость выбора величины задания  $E$ .

Полагаем, что ошибка определения плотностей  $\pm 0,037$  г/см<sup>3</sup> приемлема для геологической интерпретации разреза, принцип 1 схемы решения выполняется.

## ЭТАП 5.

### ПРОВЕРКА РаМ НА АДЕКВАТНОСТЬ

Решена обратная задача на РаМ, где плотностной разрез и наблюдаемое поле сконструированы на этапах 1 и 2 (наблюдаемое поле дополнительно поднято на постоянную величину 2,0 мГл с тем, чтобы поиск  $B_0$  выполнялся в области положительных значений). Решение выполнено на фиксированном  $\alpha_n = 0$ , выход — по минимуму функционала. Получена мера несовместимости [4]  $\mu = 0,22 \cdot 10^{-2}$  мГл.

Вывод: Мера несовместимости РаМ меньше средней квадратичной ошибки наблюдений  $E_1$ , оператор  $A$  на этапе 1 построен верно, принцип 2 схемы решения выполняется.

## ЭТАП 6.

### ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ПРИ ЗАДАННОМ ОПЕРАТОРЕ А

1) Решена обратная задача на РаМ при  $\alpha_n = 1$ ,  $E = 10^{-3}$ . С. к. приближение априорной кривой к наблюдаемой  $\pm 4,56$  мГл. Выход — по минимуму функционала. Региональный фон присутствует.  $B_0 = 1,05$  мГл (с учетом дополнительного поднятия на 2,0 мГл  $B_0 = -0,95$  мГл),  $B_1 = 0,34$  мГл/км. На предельных ограничениях определены плотности пяти тел (2, 9, 22, 32, 56). Сходимость по полю:  $\pm 0,20$  мГл.

2) Для наглядности расчетная и априорные кривые РаМ «развернуты» к условиям РеМ (см. рис. 2, А — расчетные значения, априорная).

Выводы: а) обеспечено удовлетворительное положение вектора неизвестных по отношению к предельным ограничениям;

б) выполняется критерий «невязки»;

в) принцип 3 схемы решения выполнен;

г) окончательное решение достоверно.

Таким образом, схема (см. рис. 1) реализована и задача решена.

Наиболее очевидное объяснение «плохого» решения на телах, вскрытых скважиной I, и

Номер аппроксимирующего тела	Отклонения решения на расчетной модели от значений плотностей по бурению, г/см <sup>3</sup>	Вероятная ошибка решения обратной задачи (ошибка на теоретической модели), г/см <sup>3</sup>
12	0,05	0,06
26	0,02	0,04
40	0,00	0,02

«хорошего» решения на телах, вскрытых скважиной IA, видно на рис. 2, Б. Скважина I заложена на участке профиля, «плохо» отвечающем условию задачи. Скважина IA заложена на участке профиля, «хорошо» отвечающем условию двумерности задачи. В таблице приводятся сопоставления плотностей по скважине IA.

С. к. отклонение к плотностям по подбору решением прямых задач  $\pm 0,06$  г/см<sup>3</sup>. «Плохая» сходимость с «ответом» в этом случае имеет очевидные объяснения:

1) при решении задачи подбором наклонная составляющая присутствующего регионального фона  $B_1$  (0,34 мГл/км  $\times$  50 км = 17 мГл) нашла объяснение в распределении плотностей;

2) при решении задачи подбором сходимость по полю достигнута  $\pm 0,50$  мГл, что не соответствует критерию «невязки». Основываясь на «ответе» первого порядка (сопоставление с бурением), полученном в условиях двумерности задачи (скважина IA), заключаем, что опробование МО и схемы решения выполнено с положительными результатами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для решения обратной задачи в линейной постановке программно реализован метод сопряженных градиентов на случай линейных ограничений на неизвестные с регуляризацией по А.Н.Тихонову.

2. Программа испытана на теоретических моделях и реальном разрезе вдоль профиля Средние Лангары — Мухто.

3. Опробована принципиальная схема комплексной количественной интерпретации на физическом уровне крупномасштабных гравиметрических съемок. При соблюдении условия двумерности задачи ошибка интерпретации составляет  $\pm 0,03 - 0,04$  г/см<sup>3</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голидра Г. Я. Основные методы решения прямой задачи гравиразведки на ЭВМ. — В кн.: Обзор. Регион. разв. и промысл. геофизика. М.: ВИЭМС, 1977.

2. Инструкция по гравиметрической разведке. М.: Недра, 1975.

3. Луговая В. Н., Тронева Н. Г. и др. Остров Сахалин. —

В кн.: Физические свойства осадочного покрова территории СССР. М.: Недра, 1967.

4. Старостенко В. И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наукова думка. 1978.

5. Тихонов А. Н. О математических методах автоматизации обработки наблюдений.— В кн.: Проблемы вычислительной математики. М.: Изд-во МГУ, 1980.

ИГО Сахалингеология  
Южно-Сахалинск

Поступила в редакцию  
7 апреля 1982 г.

УДК 551.24 : 551.782(265.4.04Т)

*В. В. Куделькин, Л. Э. Коган*

## СТРОЕНИЕ НЕОГЕНОВОГО ОСАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА АКВАТОРИИ ВБЛИЗИ ПОБЕРЕЖЬЯ КРАСНОГОРСКО-ИЛЬИНСКОГО РАЙОНА ЮГО-ЗАПАДНОГО САХАЛИНА

Излагаются результаты сейсмостратиграфических исследований акватории вблизи юго-западного побережья о. Сахалин. Используются данные геоакустики и опробования коренных пород бурением. Применение двухкилогерцевого «Спаркера» позволило изучить структуру неогенового осадочного чехла на глубины

до 100 м и получить детальные стратиграфические сведения. На основе сейсмофациального анализа и определения остатков диатомей в составе осадочного комплекса акватории выделены подразделения, сопоставленные со свитами юго-западного Сахалина.

### ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей работы — изучение с помощью геоакустических методов структуры осадочного комплекса акватории, расположенной вблизи юго-западного побережья о. Сахалин между широтой г. Красногорска и пос. Ильинский.

Данные сейсмоакустического профилирования и опробования коренных пород инженерно-геологическим бурением, использованные в статье, получены в 1980 г. с борта судна «Геолог» Тихоокеанской экспедицией ВМНПО Союзморгео. Профилирование выполнено по прямоугольной сети при среднем межгалсовом расстоянии 0,5 км (по широте) и 1 км (по долготе). Входящие в систему профилографа разрядник ленточного типа длиной 6 м и приемная одноканальная коса длиной 4 м буксировались на скорости судна 6 узлов с заглублением 0,25 м. Регистрация велась в частотном диапазоне 0,3—2 кГц на аналоговом аппарате ФТАК «Ладога» со временем одного цикла записи 165 мс. Технические параметры системы обеспечили излучение импульсов энергией 2,5 кДж и длительностью порядка 2мс и позволили проследить границы с углами наклона не более 22° при разрешающей способности около 3 м. Максимальная глубина, на которую удалось проследить отражения, не превысила 100 м от поверхности дна.

В качестве методической основы при геологической интерпретации данных геоакустичес-

кого профилирования был избран сейсмофациальный анализ. Под сейсмической фацией в данной работе понимается картируемое сейсмическое подразделение, состоящее из группы отражений, динамические параметры которых отличаются от параметров смежных фациальных единиц [4]. Сейсмофациальный анализ исходит из предположения, что седиментационные признаки, связанные со значительными изменениями физических свойств и обусловленные процессами осадконакопления, должны отражаться на характере сейсмической записи. Тогда каждая сейсмическая фациальная единица является акустической моделью геологической фациальной единицы и все структурные соотношения, установленные между сейсмофациями, вместе с их некоторыми типичными признаками, могут быть использованы для выводов о ходе седиментационного процесса и для построения геологической карты.

### СТРАТИГРАФИЯ

#### 1. СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТРАТИГРАФИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

Основу сейсмостратиграфической схемы верхней части осадочного комплекса исследованной акватории составляют шесть сейсмофаций, положение которых на разрезах характеризуется последовательностью их залегания и взаимоотношениями между ними.