



УДК 550.831(571.56)

## ИЗУЧЕНИЕ МОЩНОСТИ МЕЗОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В НАКЫНСКОМ КИМБЕРЛИТОВОМ ПОЛЕ ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

А.В. Манаков, В.А. Матросов, Ю.В. Утюпин, Ф.К. Зайцевский, Е.Н. Глушков

*АК «АПРОСА», Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие  
ЦНИГРИ, г. Мирный, Республика Саха (Якутия)*

Рассматриваются методика и результаты оценки мощности, перекрывающих кимберлиты Накынского поля, мезозойских отложений на основе корреляционных связей и решения обратной задачи гравиразведки для контактной поверхности методом Тсубои-Томода.

Трубки Накынского кимберлитового поля прорывают кембрийские и ордовикские образования и с несогласием перекрываются мезозойскими и кайнозойскими терригенными отложениями мощностью 60-80 м. Геологическое строение вмещающей среды отличается от других кимберлитовых полей. Трубки являются слабоконтрастными объектами, а наличие многочисленных даек, штокообразных и пластовых тел траппов, а также карстовых воронок и кор выветривания на погребенной поверхности нижнепалеозойского карбонатного цоколя создают высокий уровень помех. Это существенно снижает эффективность традиционной технологии поисков и влечет за собой необходимость применения более углубленных способов интерпретации полученных материалов. Возникает необходимость в разработке методов выявления и разбраковки помехообразующих объектов, в опережающем уточнении геологического строения для оптимального размещения поисковой сети бурения. Для изучения рельефа нижнепалеозойских образований обычно используют данные колонкового бурения по сети 4x0.5 км. Таким образом, сведения о характере погребенного рельефа кимберлитовмещающих отложений, в понижениях которого возможны скопления минералов-спутников алмазов, могут быть получены по довольно редкой сети наблюдений. Пользуясь тем, что существует значительная разница плотностей между породами нижнего палеозоя и мезозоя, достигающая 0.3-0.4 г/см<sup>3</sup> и имеются наблюдения гравитационного поля по сети 500x250 м, на основе гравиметрических данных можно прогнозировать изменение мощности перекрывающих отложений с целью размещения буровых скважин.

### Корреляционный метод обработки данных

Отметим, что подобный подход является классическим. Ранее для расчетов использовались данные гравиметрической съемки масштаба 1:10000 на сравнительно небольших площадях Мирнинского кимберлитового поля. Метод основывался на установлении корреляционной связи между величиной аномального гравитационного поля и мощностью рыхлых юрских (или пермских) отложений и подборе параметров связи между изучаемыми величинами. Для вычисления мощности рыхлых отложений по величине гравитационных аномалий использовались полиномы 3 и 4 степеней [1]. Полученная оценка точности вычислений составляла 10-15 м. Для решения этой задачи на Накынской площади использованы имеющиеся данные гравиметрии масштаба 1:50000. Решение задачи проведено по следующей технологии:

1. Исключение региональной составляющей гравитационного поля;
2. Анализ характера корреляционных связей между изучаемыми параметрами;
3. Вычисление значений мощности рыхлых отложений по гравиметрическим данным, увязка полученных значений и сравнение результатов с данными бурения.

Исключение региональной составляющей гравитационного поля заключается в пересчете наблюденного поля  $\Delta g$  в верхнее полупространство и исключении пересчитанного поля из наблюденного. Смысл этой операции заключается в том, чтобы убрать составляющую, обусловленную вещественным и структурным влиянием кристаллического фунда-

мента, который вносит значительный вклад в наблюдаемое поле. Горизонтальные размеры аномалий от фундамента составляют обычно более 30-40 км. Эффективное выделение их возможно при осреднении с радиусом более 30 км или при пересчете на высоту порядка 10 км. Было пробовано три уровня пересчета поля: 5, 10 и 15 км. В качестве оптимального параметра выбрана высота пересчета 10 км, при которой устойчиво выделяются структуры фундамента. При этой трансформации ослабляется влияние больших по площади аномалий, и сохраняются сравнительно небольшие, которые могут быть связаны с более мелкими элементами строения среды, в том числе, с изменением мощности мезозойских отложений. Хотя, как показывает опыт работ, не всегда возможно полное исключение регионального фона. Так, если крупный по площади пластообразный объект залегает на сравнительно небольшой глубине, то его гравитационное влияние в какой-то степени можно ослабить применяемыми трансформациями, но исключить целиком нельзя [2]. Определенные сложности при получении карты локальных аномалий заключаются еще и в том, что интерес представляют аномалии различного частотного состава: как связанные с породами, заполняющими крупную по размерам Уолбинскую депрессию, так и с небольшими изменениями мощности мезозоя на расстояниях, соизмеримых с сетью наблюдений. Сохраняются также при пересчетах высокочастотные аномалии линейной природы, обусловленные зонами разломов, поэтому при определении корреляционной зависимости в эталонную выборку точки с участков разломов не включаются, чтобы не вносить искажения. При вычислении мощностей мезозоя по локальным аномалиям, чтобы также избавиться от влияния разломов, было проведено осреднение расчетных мощностей с радиусом один шаг (500 м). Следует также отметить, что для рассматриваемого участка не удастся выполнить полное удаление низкочастотной составляющей поля. Так, крупная положительная аномалия в северо-восточной половине площади в трансформированном поле не исчезает. По-видимому, это связано с крупными площадными размерами и относительно неглубоким залеганием возмущающих масс. В связи с этим характер корреляционных связей в разных частях площади оказался различным, что существенно осложнило расчеты мощностей мезозойских отложений по гравиметрическим данным.

Подготовленная карта локальных аномалий, предположительно связанных с изменением мощности мезозойских отложений, анализировалась с позиции установления эмпирической связи между этими параметрами. Это выполнялось путем изучения полей корреляции между  $g_{лок}$  и мощностью отложений мезозоя. Если значение коэффициента корреляции между  $g_{лок}$  и мощностью мезозоя ( $H$ ) достаточно велико, уравнение регрессии  $H(g)$  свяжет эти параметры и позволит найти  $H$  по распределению  $g_{лок}$ . Эта операция выполняется автоматически в

программе EXCEL. При этом следует иметь в виду следующее. Программа EXCEL выполняет эту процедуру с выдачей линии тренда и уравнения регрессии, задаваясь статистическим распределением одного из параметров относительно фиксированных значений другого. В результате этого могут быть получены две линии тренда и два уравнения регрессии:  $H(g)$  и  $g(H)$ . Чем выше коэффициент корреляции, тем ближе на графике становятся линии тренда, а при коэффициенте корреляции, равном 1, что свидетельствует о наличии функциональной связи, две линии тренда сливаются в одну, а уравнение связи между параметрами становится единым [3]. Для оценки величины  $H$  по значениям  $g_{лок}$  берется уравнение регрессии  $H(g)$ , имеющее вид:  $H=A \cdot g_{лок} + B$ , где  $A$  имеет смысл коэффициента размерности, связывающего миллигалы и метры, а  $B$  – свободный член уравнения.

В тех случаях, когда изучение поля корреляции указывает на существование нескольких обособленных группировок, т.е. на наличие различных статистических связей, целесообразно разделить эти группы и выполнить расчеты по каждой группе отдельно. Однако при этом необходимо учесть возможность недостаточно плавного перехода между различными областями корреляции на результативной карте. Выявление областей различной корреляции признаков облегчается путем предварительной классификации территории по соотношению  $H$  и  $g_{лок}$  на несколько областей с помощью применения метода К-средних в пакете программ ГИС-ИНТЕГРО. Число областей классификации устанавливается в зависимости от числа групп с различной коррелируемостью. Эту операцию облегчает программа CUTXYZ, созданная лабораторией информатики и вычислительной техники ЯНИГП ЦНИГРИ. Эта программа позволяет из grid-файла значений  $g_{лок}$  вырезать области, характеризующиеся своей корреляцией. На выходе получается файл формата \*.dat. Границы областей задаются при помощи опции Digitise программы SURFER файлом \*.bin. Затем в пределах каждой области выполняется расчет  $H$  по уравнению регрессии, характерному для этой области. Полученные для каждой области файлы значений  $H$  объединяются в один на всю площадь исследований, и в программе SURFER готовится файл \*.gtd и карта мощностей мезозоя.

На корреляционном поле исследуемой площади отмечается три обособленных группировки точек. Первая группа, характеризующаяся более крутой линией регрессии  $H(g)$ , относится к юго-западной половине площади, две другие – к северо-восточной. Эти группы выявляются и при проведении классификации площади методом К-средних в пакете программ ГИС ИНТЕГРО. Классификация выполнена с учетом наличия в пределах области двух признаков: мощности пород мезозоя ( $H$ ) и величины локальных аномалий ( $g_{лок}$ ). Несмотря на то, что для северо-восточной части площади выделяются два класса, по характеру коррелируемости при-

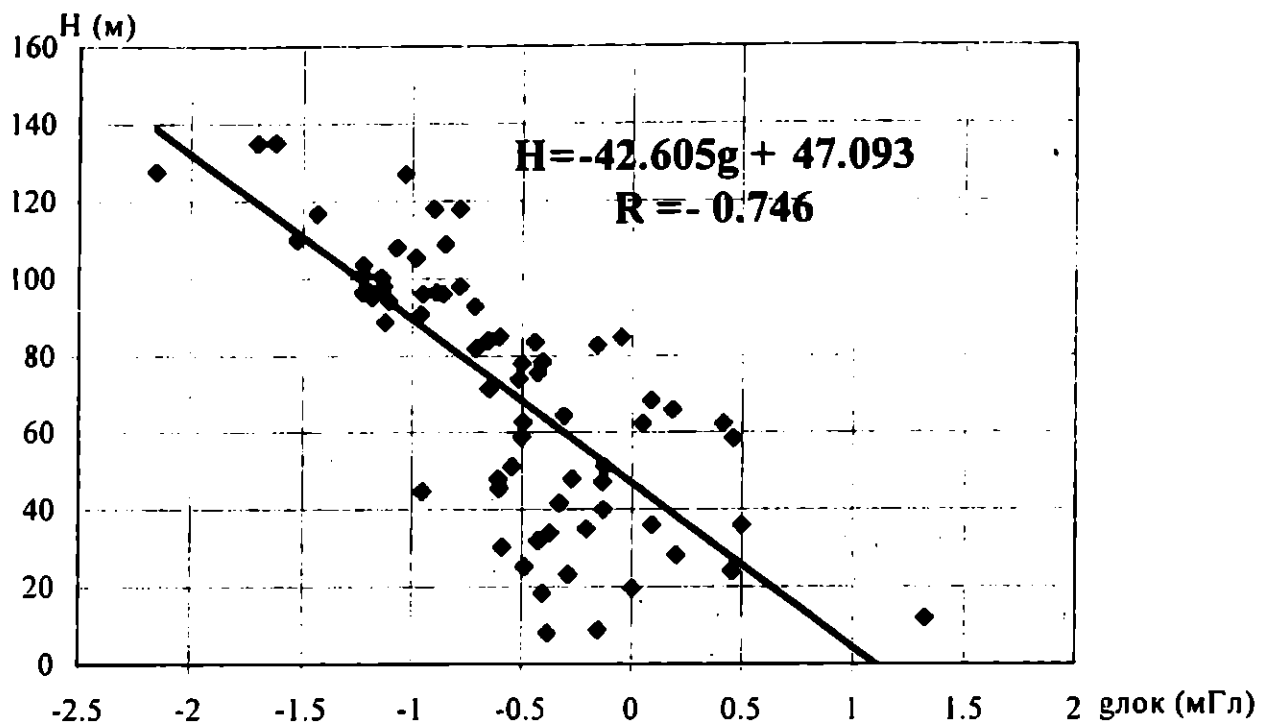


Рис. 1. Корреляция между  $g$  лок и мощностью мезозойских отложений в юго-западной части площади

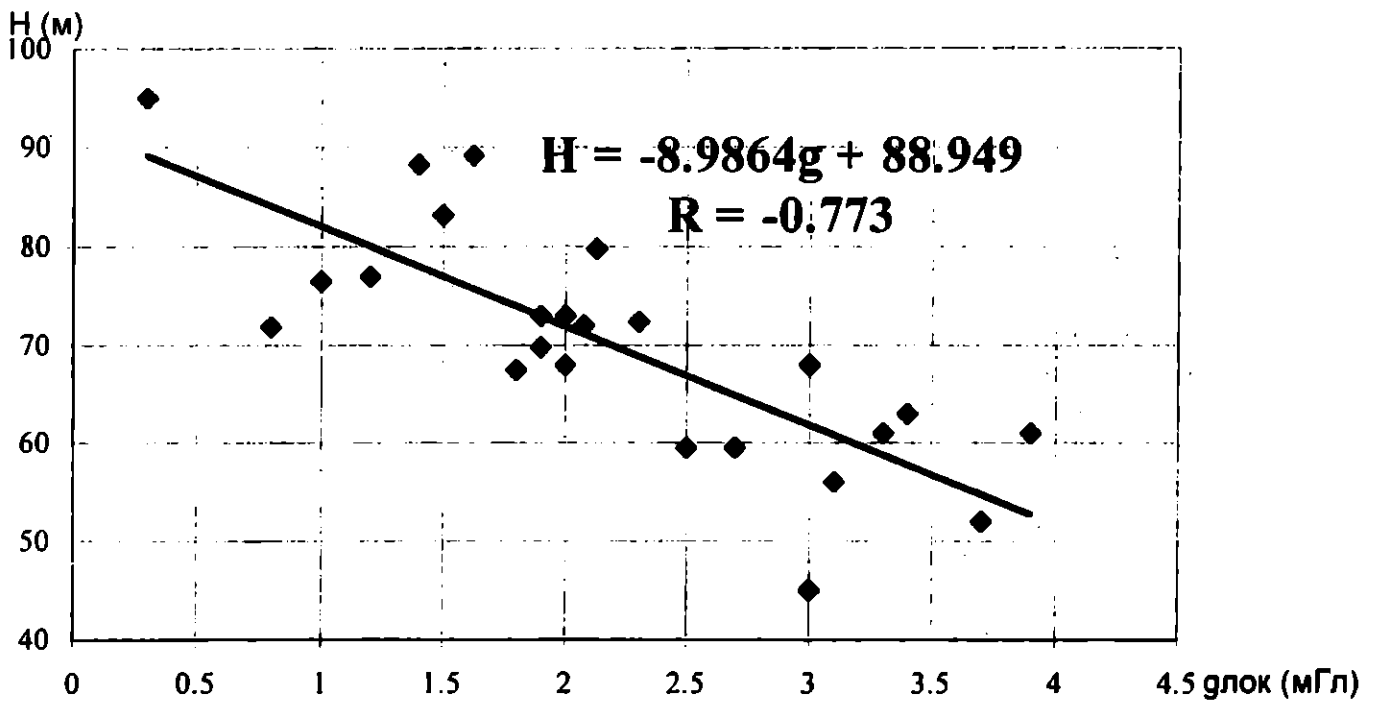


Рис. 2. Корреляция между  $g$  лок и мощностью мезозойских отложений в северо-восточной части площади

знаков они могут быть объединены в единую группу. Значение коэффициента корреляции между  $H$  и  $g_{\text{лок}}$  для юго-западной части площади составляет  $R = -0.746$  (рис. 1). Для данного числа точек (60) полученное значение коэффициента корреляции является надежным. Для северо-восточной половины площади поле корреляции представлено на рис. 2. Несмотря на меньшее число точек (30), полученное значение коэффициента корреляции  $R = -0.773$  также является надежным. Уравнения регрессии, связывающие  $g_{\text{лок}}$  и мощность мезозойских отложений для

юго-западной и северо-восточной частей площади соответственно, имеют вид:

$$H = -42.605 g + 47.09;$$

$$H = -8.99 g + 88.95.$$

На основе полученных уравнений вычислены значения мощностей мезозойских отложений (рис. 3). Юго-западная половина площади характеризуется повышенными мощностями мезозоя, превышающими 100 м. Данные бурения подтверждают наличие больших мощностей, заполняющих Уолбинскую депрессию в нижнепалеозойском основа-

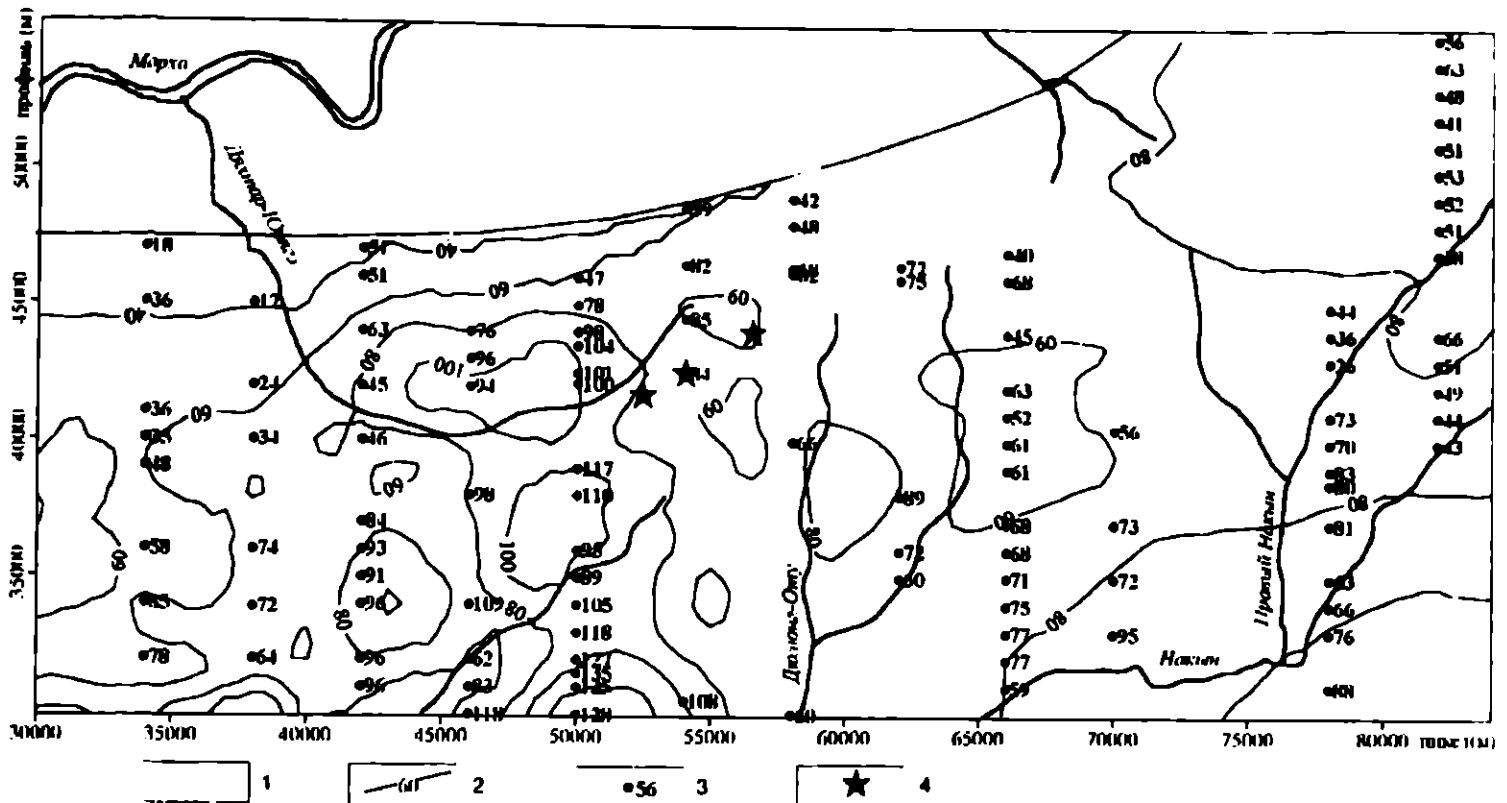


Рис. 3. Схема мощностей мезозойских отложений, построенная по гравиметрическим данным: 1 – область выклинивания пород мезозоя; 2 – изолинии мощности мезозойских отложений (м); 3 – скважины и значения мощности мезозоя; 4 – кимберлитовые трубы

нии. Высокие мощности юры также фиксируются в правом нижнем углу исследуемой площади. Завышенные мощности перекрывающих отложений по сравнению с данными бурения получены для северо-восточной части территории. Очевидно, это связано с неправильным учетом регионального фона, который меняется в пределах площади. Средняя квадратическая ошибка определения мощности мезозойских отложений по гравиметрическим данным составила 17 м. Это говорит о сравнительно невысокой точности определения мощности пород мезозоя по данным гравиметрической съемки масштаба 1:50000 в условиях Накынского поля. В данном случае это связано со сложностью корреляционных связей, что в свою очередь является следствием гетерогенности геологического строения рассматриваемой площади. Тем не менее, наличие высокой корреляции между мощностью пород мезозоя и локальными аномалиями силы тяжести на отдельных участках площади, позволяет использовать эти данные для решения задачи оценки мощности мезозоя в конкретных случаях. На локальных участках площади могут быть получены сравнительно хорошие результаты, но определения мощности для больших участков будет характеризоваться невысокой точностью.

### Определение границы раздела плотностей методом Тсубои – Томода

Второй из методов, который использовался для расчета мощностей мезозойских отложений, является численной реализацией решения обратной задачи для контактной поверхности с применением метода Тсубои – Томода и позволяет определять

отклонения глубины залегания поверхности от ее среднего значения. В классе обратных задач гравиразведки, классическая задача о контактной поверхности, разделяющей две среды с различной плотностью, является одной из важнейших. Существует несколько методов решения данной задачи. В работе рассматривается вопрос о решении этой задачи методом, предложенным Тсубои – Томода, с условной регуляризацией.

Данный метод является достаточно известным. Поэтому здесь приводится лишь его краткое описание. Исходные данные:  $g(x)$  - аномалия силы тяжести,  $H$  - глубина залегания контактной поверхности,  $\sigma$  - избыточная плотность для контактной поверхности, интервал  $(a, b)$  - на котором рассматривается контактная поверхность. Требуется найти отклонения контактной поверхности  $z(\xi)$  от средней глубины  $H$ . Линейная постановка задачи для контактной поверхности предполагает, что колебания поверхности  $z(\xi)$  малы по сравнению с глубиной  $H$  ее залегания.

Форма поверхности  $z(\xi)$  может быть найдена путем решения линейного интегрального уравнения Фредгольма I-го рода:

$$\Delta g(x) = 2G\sigma H \int_a^b \frac{z(\xi)}{(x-\xi)^2 + H^2} d\xi = \int_a^b K(x-\xi)z(\xi)d\xi \quad (1)$$

где:  $G$  - гравитационная постоянная,  $\sigma$  - избыточная плотность,  $\Delta g(x)$  - отклонения аномалии от среднего значения,  $(a, b)$  - интервал, на котором рассматривается контактная поверхность.

Пусть  $\Delta g(x_n)$  — значение  $\Delta g(x)$  в точках  $x_n = n\Delta x$ . По этим значениям функция  $\Delta g(x)$  представляется с помощью интерполяции конечной суммой ряда Котельникова — целой функцией:

$$\Delta g(x) = \sum_{n=-N}^N \Delta g(x_n) \frac{\sin[(x-x_n)\pi/\Delta x]}{(x-x_n)\pi/\Delta x} \quad (2)$$

При  $N \rightarrow \infty$

$$\Delta g(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Delta g(x_n) \frac{\sin[(x-x_n)\pi/\Delta x]}{(x-x_n)\pi/\Delta x} \quad (3)$$

причем ряд (2), (3) сходятся равномерно в любой конечной подобласти. Подставив в левую часть (1) ряд (2) и перейдя к образам Фурье, по теореме о свертке получают:

$$z_N(\omega) = \begin{cases} \sum_{n=-N}^N \frac{\Delta x \Delta g(x_n)}{2\pi^2 G\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{ix_n\omega + H|\omega|}, & |\omega| \leq \pi/\Delta x \\ 0, & |\omega| \geq \pi/\Delta x \end{cases}$$

Переходя к функции  $z_N(x)$ , получают формулу:

$$z_N(x) = \sum_{n=-N}^N \frac{\Delta x \Delta g(x_n)}{2\pi^2 G\sigma} e^{Hx} \frac{H \cos[(x-x_n)\pi/\Delta x] + (x-x_n) \sin[(x-x_n)\pi/\Delta x]}{H^2 + (x-x_n)^2} \quad (4)$$

При  $x=x_k$ , формула (4) принимает вид:

$$z_N(x_k) = \sum_{n=-N}^N \frac{\Delta x H \Delta g(x_n)}{2\pi^2 G\sigma} \frac{(-1)^{k-n} e^{H\pi/\Delta x} - 1}{H^2 + (k-n)^2 (\Delta x)^2} \quad (5)$$

Доказано [4], что задача определения  $z(x)$  по формулам (4), (5) — некорректно поставленная. При согласовании  $H$  и  $\Delta x$  можно обеспечить сходимость приближенных решений по формулам, (4), (5) к точному решению. Выбор  $\Delta x$  и  $H$  является условной регуляризацией метода Тсубои. Роль параметра регуляризации в данном случае играет величина  $\eta = \Delta x/H$ . Численные расчеты показали, что  $\eta$  изменяется от 0,7 до 1,2 при изменении погрешности от 1% до 10%. Для выбора оптимального  $\eta$  предложен эмпирический критерий сравнения последовательных приближений:

$$\min_{\eta} \left| \eta \frac{\partial z}{\partial \eta} \right|.$$

Численная реализация:

Программа выполнена в среде Borland Delphi 5 Professional. Работает в операционных системах Windows 95, 98, NT, 2000.

1. Программа работает с текстовыми файлами, в которых данные содержатся в виде 2 столбцов — значения  $x$ , и  $y$ . Количество точек ограничено 20000.

2. В программе предусмотрена линейная интерполяция аномалии с шагом, для которого параметр регуляризации равен 1 — это позволяет готовить данные, не используя других программ.

3. При работе с прямыми и обратными задачами для контактной поверхности часто приходится обращаться то к самим кривым, то к отклонениям

этих кривых от среднего значения, поэтому в программе предусмотрена возможность выделения отклонений из кривой, и создание кривой из отклонений.

4. Применяя метод Тсубои для различных моделей, было замечено, что очень часто на краях рассматриваемого отрезка возникают колебания (иногда превосходящие максимум ожидаемых отклонений в десятки раз), поэтому желательно исходную аномалию задавать на более широком отрезке, а после проведения расчетов следует отбрасывать несколько значений на концах отрезка.

Ограничение на исходные данные:

1. Предполагается, что колебания контактной поверхности малы по сравнению с глубиной ее залегания.

2. Исходная кривая выбрана так, что выполняется условие регуляризации.

3. Предполагается что отрезок, на котором рассматривается аномалия, достаточно велик по сравнению с глубиной залегания контактной поверхности.

Заметим, что, несмотря на простоту применения метода, он не является достаточно распространенным. Одной из причин, по-видимому, является довольно жесткие условия постановки задачи. При постановке вопроса об использовании этого метода авторы столкнулись с необходимостью предварительной обработки данных. Исходя из опыта, предлагается последовательность процедур или, так называемый, граф обработки данных полевых съемок. Последовательность выполнения операций может быть различной:

1) удаление регионального фона, выделение локальной составляющей; 2) сглаживание локальной составляющей, удаление шумов; 3) интерполяция с шагом, примерно равным предполагаемой глубине залегания; 4) непосредственно вычисление линии раздела с применением метода Тсубои, или: 1) удаление регионального фона, выделение локальной составляющей; 2) интерполяция с шагом, примерно равным предполагаемой глубине залегания; 3) вычисление линии раздела с применением метода Тсубои; 4) сглаживание полученной линии раздела плотностей с использованием опорных точек, полученных по данным бурения. Причем, на взгляд авторов, вторая последовательность является более предпочтительной, поскольку в первом случае на втором шаге проводится абстрактное сглаживание. Во втором же случае сглаживание проводится уже на последнем этапе и проводится оно не абстрактно, а с учетом данных бурения, которые в любом случае должны быть в наличии для применения метода Тсубои.

Практическое опробование метода выполнено на участке Накынского кимберлитового поля по нескольким гравиметрическим профилям съемки масштаба 1:50000, на которых имеются пробуренные скважины и известна глубина до пород нижнего палеозоя. Для расчета использовались гравиметри-

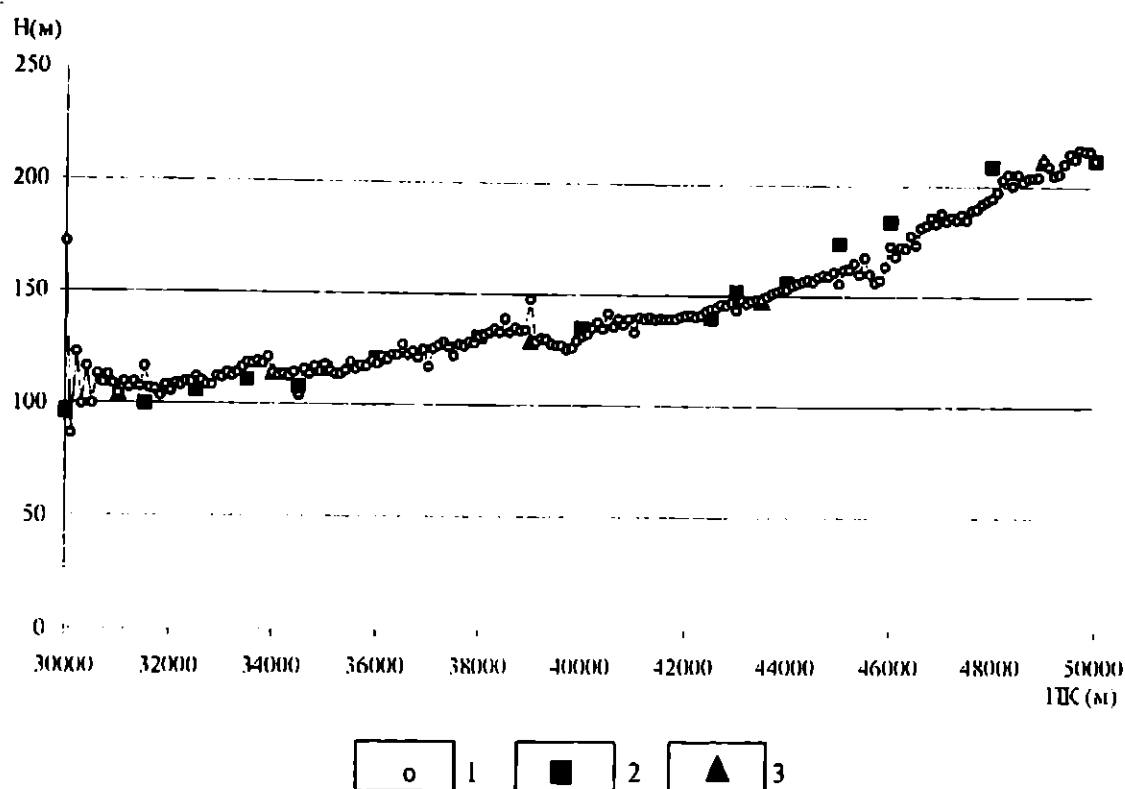


Рис. 4. Определение глубины до кровли нижнего палеозоя методом Тсубои: 1 – точки определения глубин; 2 – базовые скважины; 3 – контрольные скважины

ческие профили с локальными значениями поля силы тяжести (пересчет вверх на 10 км), поскольку они имеют достаточно тесную корреляционную связь с мощностью мезозойских отложений, следовательно, и с глубиной залегания погребенного рельефа нижнепалеозойских образований. Пример расчетов, и характер результативных графиков показан на рис. 4. Расчет глубин залегания по методу Тсубои ведется в предположении об известных глубине залегания границы раздела и избыточной плотности вдоль этой границы. На практике эти сведения не всегда известны и от степени их достоверности зависит точность определения глубины границы раздела. Другим ограничением метода является требование о практически полном отсутствии тренда вдоль расчетного профиля. При опробовании метода в качестве избыточной плотности вдоль границы нижний палеозой - мезозой была принята величина  $-0.3\text{г/см}^3$ . Для оценки средней глубины залегания границы раздела использована карта рельефа кровли нижнепалеозойских отложений, составленная по данным бурения. Затем были выбраны 8 профилей удовлетворяющих в первом приближении всем ограничениям метода и по ним выполнены расчеты. Условие горизонтальности средней границы в нашем случае соблюдается лишь для отдельных профилей: основная часть рельефа осложнена значительной по площади депрессией. Таким образом, существует определенный тренд изменения глубины залегания границы раздела, который может быть учтен по отдельным буровым скважинам. При наличии тренда отметки глубин вычисляются от некоторой средней горизонтальной пинии в предположении отсутствия тренда, а затем положение этой

линии приведения корректируется по буровым скважинам. Эту операцию можно осуществить в программе EXEL. Для этого туда вводятся дополнительные столбцы с отметками глубин по скважинам. Затем рассчитываются невязки между расчетными значениями и отметками по скважинам. После их интерполяции по профилю, невязки разбрасываются в расчетные значения.

На некоторых расчетных профилях отмечается заметная флюктуация в краевых частях, достигающая десятков метров, что, вероятно, связано с особенностями алгоритма, представляющего расчетную функцию в виде набора гармоник. В основной части расчетных графиков флюктуация также присутствует, но в существенно меньшей степени, составляя всего 8-10 метров. Среднеквадратическая ошибка вычислений рассчитывалась после исключения отдельных «выскоков» в краевых частях профилей. Величина ошибки  $\pm 10$  м свидетельствует о достаточно надежном решении задачи. Следует отметить, что данная ошибка характеризует локальную составляющую древнего рельефа, вычисленного от уровня приведения.

Рельеф кровли нижнепалеозойского основания получен как разность между высотными отметками гравиметрических пунктов и значениями рассчитанной по геофизическим данным мощности мезозойских отложений (рис. 5). Четко отмечается депрессия по поверхности погребенного рельефа в междуречье Дяхтар-Юрягэ и Дюлюнг-Оту. Эта депрессия разделена на части: одна уходит на северо-запад и относится к области Уолбинской депрессии. Более мелкие впадины отмечаются в бассейне р. Дюлюнг-Оту и в районе пикетов 35000-40000 на юге

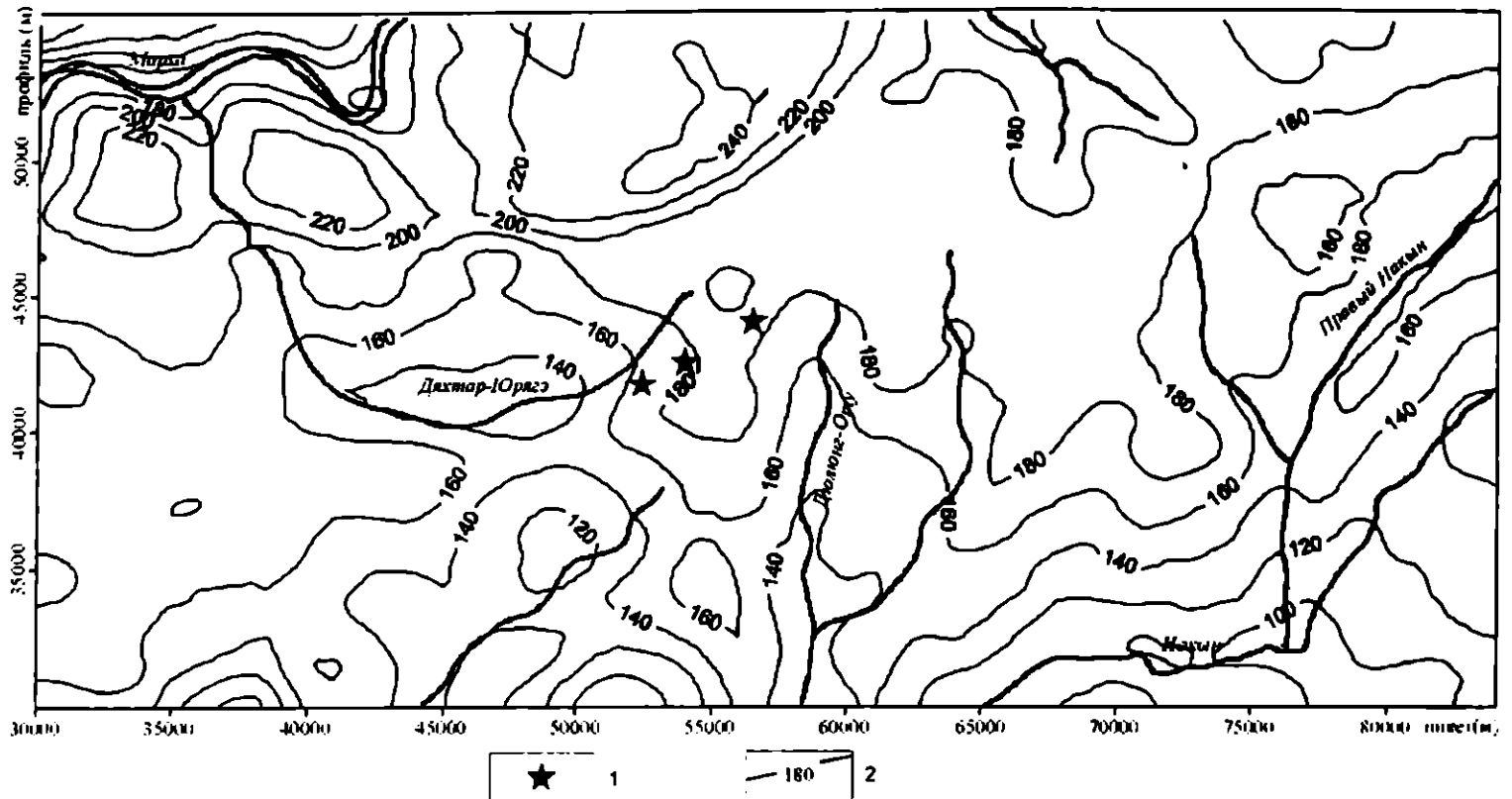


Рис. 5. Схема рельефа нижнепалеозойского карбонатного цоколя по геофизическим данным: 1 – кимберлитовые трубки; 2 – изолинии рельефа нижнепалеозойских пород (м)

участка. Прогиб нижнепалеозойского рельефа отмечается и в северо-восточной части площади, в бассейне р.р. Накын и Правый Накын. Отметки древнего рельефа здесь понижаются до 100 м относительно 200 м. Общее направление депрессии субмеридиональное. В целом отмечается достаточно неплохое сходство нижнепалеозойского рельефа построенного по данным гравirazведки и по редкой сети буровых скважин. Кимберлитовые трубки локализуются в пределах локальной линейной впадины северо-восточного простирания в рельефе карбонатного цоколя. В северо-западной части мощности мезозоя составляют менее 40-50 м с увеличением значений к востоку. В бассейне р. Мархи нижнепалеозойские породы выходят на земную поверхность.

### Выводы

1. Наличие высокой корреляции между мощностью мезозойских отложений и локальными аномалиями силы тяжести позволяет использовать эти данные для построения карты мощностей перекрывающих отложений и карты рельефа нижнепалеозойского карбонатного цоколя. В пределах Накынской площади, характеризующейся сложным геологическим строением, не существует единой зависимости мощности перекрывающих отложений от поля силы тяжести, поэтому на отдельных локальных участках могут быть получены сравнительно хоро-

шие результаты, но определения мощности для больших территорий будет характеризоваться невысокой точностью.

2. Расчет глубин залегания нижнепалеозойских образований по методу Тсубои ведется в предположении об известной глубине залегания границы раздела и избыточной плотности вдоль этой границы. При наличии тренда вдоль расчетного профиля отметки глубин можно вычислять от некоторой средней горизонтальной пинии, а затем положение этой линии приведения корректируется по буровым скважинам путем разбрасывания невязки между ними. Точность определения глубины границы раздела составила  $\pm 10$  м.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Саврасов Д.И., Камышева Г.Г. Физические свойства докембрийских кристаллических пород Анабарского щита // Учен. зап. НИИГА. Регион. Геология.- 1966.- Вып.8.- С. 168-187.
2. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка.- Л., 1973.- 352с.
3. Тернер К. Вероятность, статистика и теория информации.- М., 1976.- 256с.
4. Филатов В.Г. Применение метода Тсубои в обратных задачах гравirazведки // Прикладная геофизика.- М., 1972.- Вып. 68.- С.56-70.
5. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики.- М., 1980.- 286с.