

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НЕФТИ И ГАЗА им. И.М.ГУБКИНА**

Кафедра разведочная геофизика и компьютерных систем

На правах рукописи
УДК 550.831:681.3

04200953690

Ляндрес Александр Юрьевич

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АНОМАЛИЙ
ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗНАЧЕНИЙ ЕГО
ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА**

Специальность: 25.00.10

«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Диссертация

На соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор С.А. Серкера

Москва – 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Актуальность проблемы	4
Цель и задачи работы	5
Научная новизна работы	6
Практическая значимость	7
Защищаемые положения	7
Реализация и апробация работы	7
Публикации и личный вклад в решение проблемы	8
Объем и структура работы	8
Глава 1. Вспомогательные сведения, необходимые для решения поставленных задач	9
1.1 Определение спектров аномалий	9
1.2 Аналитические выражения аномалий гравитационного поля и их спектров для наиболее применяемых на практике тел правильной формы	11
1.3 Способы определения значений вертикального градиента гравитационного поля ..	15
Глава 2. Учет значений вертикального градиента при высокоточных гравиметрических работах и возможности их применения при изучении процессов переноса масс в пластах	20
2.1. Учет поправки за высоту пунктов наблюдений при высокоточных гравиметрических работах	21
2.1.1. Определение поправки за высоту точки наблюдения	22
2.1.2. Учет значений аномального вертикального градиента	24
2.2. Возможности применения вариаций вертикального градиента при изучении процессов переноса масс в пластах	29
2.3. Определение гравитационного влияния от изменений масс в пластах при снижении пластового давления	31
2.3.1. Изменения плотности пластового флюида и водонасыщенных глинистых пород	32
2.3.2. Гравитационное поле, связанное с изменением плотности пластового флюида и водонасыщенных глинистых пород	36
2.3.3. Изменения значений вертикального градиента, связанные с изменениями плотности пластового флюида и водонасыщенных глинистых пород	45
Глава 3. Определение формы и параметров источников гравитационного поля с использованием аномалий вертикального градиента	51
3.1. Интерпретация аномалий по совместному анализу значений вертикальной и горизонтальной производных гравитационного поля	52
3.1.1. Применение значений горизонтальных координат характерных точек аномалий V_{xz} и V_{zz}	52
3.1.2. Применение интегральных значений аномалий V_{xz} и V_{zz}	59
3.2. Совместная интерпретация вертикального градиента поля со значениями исходного гравитационного поля, его вертикальной производной второго порядка и спектров аномалий	62
Второй способ	69
Третий способ	70
Четвертый способ	71
Глава 4. Результаты практического применения разработанных способов интерпретации аномалий гравитационного поля	77
4.1 Практические схемы вычисления вертикальной производной гравитационного поля	77

4.2 Результаты практического опробования вычислительных схем.....	80
4.3. Результаты опробования разработанных способов определения формы и параметров тел.....	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	103
Список литературы.....	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

Обеспечение ускоренного развития работ по геологическому изучению территории страны, увеличение запасов минеральных ресурсов, в первую очередь топливно-энергетических, зависит от развития геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, в частности наиболее мобильных и наименее дорогих из них – гравиразведки и магниторазведки. Развитие этих методов и повышение геолого-экономической эффективности их применения является актуальной народно-хозяйственной задачей, решение которой в значительной степени зависит от совершенствования существующих и создания новых более надежных математических методов обработки и интерпретации. Такими методами являются и методы интерпретации наблюдаемых суммарных гравитационных и магнитных аномалий, основанные на анализе исходного поля и значений его вертикальной производной первого порядка.

В настоящее время при интерпретации аномалий гравитационного поля относительно мало пользуются значениями вертикальной производной первого порядка (вертикального градиента), даже меньше, чем значениями вертикальной производной второго порядка. Одной из причин такого положения является трудность в практических вычислениях значений вертикального градиента, имеющие по сравнению с вычислениями производных второго порядка. В то же время значения вертикального градиента ближе к значениям исходного гравитационного поля и сохраняет в неискаженном и более читаемом виде информацию об источниках поля, чем значения вертикальной производной второго порядка. Поэтому более широкое вовлечение в процесс интерпретации значений вертикального градиента гравитационного поля является весьма актуальной задачей. При

этом совместная интерпретация аномалий силы тяжести и ее вертикальной составляющей позволяет уменьшить неоднозначность решения обратной задачи, решать ряд новых задач, например, определение формы источников поля, делает возможным получение более достоверных и надежных сведений о геометрии и месторасположении аномальных тел.

Задачи, решаемые в данной диссертационной работе, относятся к наиболее общей проблеме – проблеме решения обратной задачи гравиразведки, в том числе и с применением спектрального анализа аномалий.

В различные направления этой проблемы в разные годы большой вклад внесли многие российские и зарубежные исследователи: Ю.В.Антонов, В.И.Аронов, Ю.И.Блох, А.А.Булычев, К.В.Гладкий, В.Н. Глазнев, Ф.М.Гольцман, Т.Б.Калинина, В.И.Костицын, В.Н.Луговенко, Р.В.Мелихов, А.А.Никитин, С.А.Серкера, В.Н.Страхов, А.Л.Харитонов, M.Bat, A.Spector, F.S.Grant, B.Bhattacharia и ряд других исследователей.

Цель и задачи работы.

Целью исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, является анализ возможностей применения вертикального градиента поля при высокоточных гравиметрических работах и разработка способов совместной интерпретации вертикального градиента с другими элементами поля силы тяжести.

В соответствии с поставленной целью автором решается ряд конкретных задач, основными из которых являются:

1. Анализ методики учета поправок за высоту пунктов наблюдений и за аномальный вертикальный градиент при высокоточных гравиметрических работах.

2. Оценка возможностей применения вертикального градиента при повторных гравиметрических работах с целью контроля разработки месторождений нефти и газа.

3. Разработка способов совместной интерпретации вертикального градиента со значениями исходного гравитационного поля, других его производных и спектров аномалий.

4. Получение способов практического определения вертикальной производной поля, способствующих ее широкому применению в практике интерпретации аномалий гравитационного поля.

5. Создание методики применения способов интерпретации аномалий гравитационного поля с использованием значений его вертикального градиента.

6. Опробование разработанных способов анализа и интерпретации на модельных и практических примерах аномалий гравитационного поля.

Научная новизна работы.

1. Разработаны основные положения использования вертикального градиента гравитационного поля при мониторинге процесса разработки месторождений нефти и газа.

2. Разработаны способы совместной интерпретации вертикального градиента со значениями исходного гравитационного поля, его горизонтальной производной, вертикальной производной второго порядка и спектров аномалий.

3. Предложены и опробованы на практических материалах наиболее удобные для вычислений способы определения вертикального градиента гравитационного поля.

4. Получены аналитические выражения опробования разработанных способов интерпретации аномалий на примерах гравитационного поля от наиболее применяемых на практике модельных тел правильной формы.

5. Разработана методика совместного анализа значений вертикального градиента со значениями исходного гравитационного поля, других его производных и спектров аномалий.

Практическая значимость.

Практическая значимость работы заключается в совершенствовании методики анализа и интерпретации гравитационных аномалий, в частности в привлечении к интерпретации аномалий в условиях минимума априорной информации в комплексе с другими элементами поля, значений их вертикального градиента, что повышает надежность получаемых данных; в разработке способов интерпретации, обладающих новыми возможностями, например, позволяющих легко определить форму аномальных источников, что приводит к уменьшению неоднозначности решения обратной задачи гравиразведки; в предложенном способе практических вычислений, позволяющем вести массовые определения значений вертикального градиента в условиях полей различной сложности и широко внедрять их в практику интерпретации аномалий гравитационного поля.

Защищаемые положения.

1. Разработанные положения применения значений вертикального градиента гравитационного поля при высокоточных работах, позволяющие использовать их при мониторинге нефтегазовых месторождений.
2. Полученный в результате теоретических и модельных исследований аналитический аппарат, положенный в основу способов анализа гравитационного поля, способствующий широкому внедрению в практику интерпретации значений вертикального градиента.
3. Разработанные способы и методика совместного анализа значений исходного гравитационного поля, его вертикального градиента и других производных, позволяющие в первую очередь определить форму источников поля, приводящие к уменьшению неоднозначности решения обратной задачи гравиразведки.

Реализация и апробация работы

Реализация и апробация работы осуществлялись в процессе создания методики применения разработанных способов интерпретации и

опробования их на модельных и практических материалах. Основные положения и результаты исследований диссертационной работы опубликованы в научных изданиях, обсуждались и докладывались на кафедре разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина и на конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России» (2007 г.).

Публикации и личный вклад в решение проблемы

Диссертация основана на теоретических, методических и экспериментальных исследования, выполненных лично автором.

По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ, четыре из них в рекомендованных ВАК РФ журналах.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения и содержит 111 страниц машинописного текста, 18 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 71 наименование.

Глава 1. Вспомогательные сведения, необходимые для решения поставленных задач.

В данной главе приведены основные сведения справочного характера, необходимые для дальнейшего изложения материала и решения поставленных задач.

1.1 Определение спектров аномалий.

Примем, что функции $f(x)$ и $f(x, y)$ являются элементами двухмерного и трехмерного потенциальных полей. Предположим, что они являются абсолютно интегрируемыми. Для таких аномалий существует пара преобразований Фурье. В двухмерном случае [51]

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-i\omega x) dx, \quad (1.1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp(i\omega x) d\omega, \quad (1.2)$$

где ω - так называемая пространственная частота или волновое число.

Аналогично для трехмерных аномалий

$$S(u, v) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-i(ux + vy)] dx dy, \quad (1.3)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u, v) \exp[-i(ux + vy)] du dv , \quad (1.4)$$

где u, v – также пространственные частоты или волновые числа.

Формулы (1.1) – (1.4) написаны в симметричной форме записи.

Здесь и в дальнейшем будем пользоваться этой формой записи. В выражениях (1.1) и (1.4) функции $S(\omega)$ и $S(u, v)$ являются трансформантами Фурье аномалий $f(x)$ и $f(x, y)$ или называются их спектрами.

Предположим, что трехмерная гравитационная или магнитная аномалия $f(x, y)$ является осесимметричной (симметричной относительно вертикальной оси), т.е.

$$f(x, y) = f(r) = f\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right) ,$$

$$\text{где } r = \sqrt{x^2 + y^2} .$$

Для таких аномалий равенства (1.1) и (1.4) примут вид [4,41,42]

$$S(\rho) = \int_0^{\infty} r f(r) J_0(\rho r) dr , \quad (1.5)$$

$$f(r) = \int_0^{\infty} \rho S(\rho) J_0(\rho r) d\rho , \quad (1.6)$$

где

$$\rho = \sqrt{u^2 + v^2} .$$

Выражения (1.5), (1.6), как известно, являются парой преобразований Ханкеля нулевого порядка.

Обозначим через $\Phi(\omega)$ $\Phi(u, v)$ частотные характеристики способов преобразований или трансформаций соответственно двухмерного и трехмерного элементов потенциальных полей $f(x)$ и $f(x,y)$. Тогда справедливы равенства

$$S_T(\omega) = S(\omega)\phi(\omega), \quad (1.7)$$

$$S_T(u, v) = S(u, v)\phi(u, v), \quad (1.8)$$

где $S_t(\omega)$ и $S_t(u, v)$ являются спектрами трансформированных аномалий $f_t(x)$ и $f_t(x,y)$. Выражения (1.7) и (1.8) определяют связь между спектрами исходной и трансформированной аномалий.

На основании выражений (1.7) и (1.8) равенства (1.2), (1.4) и (1.6) можно записать в следующем более общем виде

$$f_T(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)\phi(\omega) \exp(i\omega x) d\omega, \quad (1.9)$$

$$f_T(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u, v)\phi(u, v) \exp[+i(ux + vy)] du dv, \quad (1.10)$$

$$f_T(r) = \int_0^{\infty} \rho S(\rho)\phi(\rho) J_0(\rho r) d\rho. \quad (1.11)$$

1.2 Аналитические выражения аномалий гравитационного поля и их спектров для наиболее применяемых на практике тел правильной формы.

Приведем ниже выражения аномалий силы тяжести и их вертикального градиента для наиболее применяемых на практике тел правильной формы, а также выражения спектров этих аномалий и соотношения, определяющие значения горизонтальных координат точки

максимума спектров вертикальной производной первого порядка (вертикального градиента) наблюдаемого поля [51 – 53].

Примем обозначения: G – гравитационная постоянная; σ , μ , λ - объемная, поверхностная и линейные плотности аномальных тел; h , h_1 , h_2 - значения глубины залегания центра тел, глубин залегания верхней и нижней границ источников; n – порядок производной (вертикальной или горизонтальной), ω_m - горизонтальная координата точки максимума модуля спектра производных исходного поля первого порядка.

1. Бесконечный горизонтальный круговой цилиндр или бесконечная горизонтальная материальная линии. Аномалия силы притяжения V_z и ее вертикальная производная V_{zz}

$$V_z(x) = \frac{2G\lambda h}{x^2 + h^2}, \quad (1.12)$$

$$V_{zz}(x) = 2G\lambda \frac{\xi^2 - x^2}{(\xi^2 + x^2)^2}. \quad (1.13)$$

Спектр аномалии силы притяжения

$$S(\omega)_{V_z} = \sqrt{2\pi} G \lambda \exp(-|\omega| h). \quad (1.14)$$

Выражение спектра первой вертикальной производной аномалии силы притяжения получим отсюда умножением на частотную характеристику операции

$$\Phi(\omega) = |\omega|.$$

Горизонтальная координата точки максимума спектра вертикально производной поля первого порядка

$$\omega_m = \frac{1}{h} .$$

Бесконечная горизонтальная материальная полоса шириной $2L$.

$$V_z(x) = 2G\mu(\operatorname{arctg}\frac{x+l}{h} - \operatorname{arctg}\frac{x-l}{h}) , \quad (1.15)$$

$$V_{zz}(x) = 2G\mu\left(\frac{x+l}{(x+l)^2 + h^2} - \frac{x-l}{(x-l)^2 + h^2}\right), \quad (1.16)$$

$$S(\omega)_{V_z} = 2\sqrt{2\pi}G\mu\exp(-|\omega|_h)\frac{\sin(\omega L)}{\omega} , \quad (1.17)$$

$$\omega_m = \frac{1}{l} \operatorname{arctg}\frac{l}{h} . \quad (1.18)$$

3. Бесконечная вертикальная материальная полоса

$$V_z(x) = G\mu \ln \frac{x^2 + h_2^2}{x^2 + h_1^2} , \quad (1.19)$$

$$V_{zz}(x) = 2G\mu\left(\frac{h_1}{x^2 + h_1^2} - \frac{h_2}{x^2 + h_2^2}\right), \quad (1.20)$$

$$S(\omega)_{V_z} = \sqrt{2\pi} G \mu \frac{1}{|\omega|} [\exp(-|\omega|h_1) - \exp(-|\omega|h_2)] , \quad (1.21)$$

$$\omega_m = \frac{1}{h_2 - h_1} \ln \frac{h_2}{h_1} . \quad (1.22)$$

4. Шар или точечная масса .

$$V_z(x, y) = GM \frac{h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} . \quad (1.23)$$

При $y = 0$

$$V_{zz} = GM \frac{2h^2 - x^2}{(x^2 + h^2)^{\frac{5}{2}}} ; \quad (1.24)$$

$$S_{V_z}(\rho) = GM \exp(-\rho h) , \quad (1.25)$$

$$\rho_m = \frac{1}{h} . \quad (1.26)$$

5. Вертикальная материальная линия

$$V_z(x, y) = G\lambda \left(\frac{1}{\sqrt{-x^2 - y^2 + h_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{-x^2 - y^2 + h_2^2}} \right). \quad (1.27)$$

При $y=0$

$$V_{zz} = G\lambda \left[\frac{h_1}{(x^2 + h_1^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{h_2}{(x^2 + h_2^2)^{\frac{3}{2}}} \right]; \quad (1.28)$$

$$S(\rho) = G\lambda \frac{1}{\rho} [\exp(-\rho h_1) - \exp(-\rho h_2)];$$

$$\rho_m = \frac{1}{\Delta h} \ln \frac{h_2}{h_1}, \quad \Delta h = h_2 - h_1. \quad (1.29)$$

1.3 Способы определения значений вертикального градиента гравитационного поля.

Все известные на практике способы вычисления вертикального градиента основаны на применении интеграла Пуассона, который определяет значения гравитационного поля в верхнем полупространстве по его значениям, измеренным на поверхности Земли. К ним относятся способы К.Ф.Тяпкина, К.Е.Веселова, А.К.Маловичко [1, 43].

Не останавливаясь на выводе вычислительных формул, приведем в качестве примера формулы для определения вертикальной составляющей

силы притяжения $V_{zz}(0,0,0)$ на плоскости наблюдений по значениям функции $V_z(r,\alpha,0)$. Исходной служит формула

$$\begin{aligned}
 V_{zz}(0,0,0) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty [V_z(r, \alpha, 0) - V_z(0,0,0)] \frac{dr d\alpha}{r^2} = \\
 &= \int_0^\infty [\overline{V_z(r)} - V_z(0,0,0)] \frac{dr}{r^2} ,
 \end{aligned} \tag{1.30}$$

где

$$\overline{V_z(r)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_z(r, \alpha) d\alpha .$$

- среднее значение $V_z(r,\alpha,0)$ на окружности радиусом r .

В палетке, составленной К.Ф.Тяпкиным, вся область интегрирования разбита на 14 площадок равного действия. Вычислительная формула имеет вид

$$V_{zz}(0,0,0) = \frac{K_1}{r_0} \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^{10} \delta V_{zik} + \frac{K_2}{r_0} \sum_{i=6}^{14} \sum_{k=1}^{10} \delta V_{zik} ,$$

где

$$\delta V_{zik} = V_{zik} - V_z(0,0,0).$$

Постоянных коэффициентов в формуле два: во внутреннем круге (зоны с номерами до пяти) 0,5; во внешнем (зоны с номерами от 6 до 14) 0,05. Величина r_0 играет роль единицы измерения, принятой при вычислениях и выраженной в масштабе карты, с которой снимаются отсчеты, и может быть любой.

Приведем радиусы центров площадок равного действия в единицах r_0 :

Таблица 1.1

$r_1 = 0,31$	$r_6 = 1,37$	$r_{11} = 3,63$
$r_2 = 0,36$	$r_7 = 2,11$	$r_{12} = 4,45$
$r_3 = 0,45$	$r_8 = 2,35$	$r_{13} = 5,70$
$r_4 = 0,57$	$r_9 = 2,68$	$r_{14} = 8,00$
$r_5 = 0,80$	$r_{10} = 3,08$	

При расчетах влияние центральной зоны $0 \div r_0$ учитывают поправками, вычисленными при определенных предположениях о характере изменения функции в окрестностях точки $(0, 0, 0)$. Вкладом интеграла за пределами радиуса r_n , как правило, пренебрегают или также вносят соответствующие поправки.

В схеме, предложенной А.К.Маловичко, концентрические окружности проведены через равные интервалы так, что $r_2 - r_1 = r_3 - r_2 = \dots = r_1 = 1$

Вычислительная формула, реализуемая с помощью этой палетки, имеет вид

$$V_{zz}(0,0,0) = \sum_{i=1}^5 K_i [\overline{V_z(r_i)} - \overline{V_z(r_6)}] + \overline{V_z(r_1)} + \overline{V_z(r_6)} - 2V_z(0), \quad (1.31)$$

где $\overline{V_z(r_i)}$ - среднее значение V_z на окружности радиусом r_i .

Коэффициенты K_i равны: $K_1=0,25$; $K_2=0,333$; $K_3=0,125$; $K_4=0,067$; $K_5=0,042$.

Радиусы и соответствующие им коэффициенты палетки, рассчитанной К.Е.Веселовым, представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Коэффициенты палетки К.Е.Веселова

r_i/r_o	$K_i r_0$	r_i/r_o	$K_i r_0$	r_i/r_o	$K_i r_0$
0,1	2,5	2,735	0,160	10,190	0,029
0,2	7,5	4,123	0,094	13,564	0,021
0,566	1,25	5,831	0,053	18,559	0,017
1,058	0,536	7,736	0,033	21,8	0,046
1,755	0,260				

Здесь r_0 также равно единице измерения, принятой при построении палетки.

Если первые два радиуса (0,1 и 0,2) заменить одним, то вместо первых двух строк будет

$$\frac{r_1}{r_0} = 0,4; \quad k_1 r_0 = 10,0 .$$

Вычислительная формула, реализуемая палеткой, имеет вид

$$V_{zz}(0,0,0) = \sum_{i=1}^{13} V_z(r_i) K_i .$$

В двумерной задаче формула вертикальной составляющей градиента потенциала притяжения при $z = 0$ примет вид

$$V_{zz}(0,0) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [V_z(\xi, 0) - V_z(0,0)] \frac{d\xi}{\xi^2} .$$

Из сравнения этого выражения с формулой (1.30) следует, что в двумерном случае коэффициенты линейной палетки в π раз меньше соответствующих коэффициентов палеток для трехмерной задачи; расстояния же узлов линейной палетки от центральной точки равны

радиусам трехмерной палетки. Поэтому соотношения, выведенные для трехмерной задачи, можно использовать для построения линейных палеток.

Из выражений приведенных вычислительных схем видно, что они являются многочленными, особенно способы К.Е.Веселова и К.Ф.Тяпкина – 13 и 14 членов, радиусы схем и методика их применения являются неудобными для практических расчетов. Наиболее удобным из рассматриваемых способов является способ А.К.Маловичко. Он состоит из 7 членов, при расчетах нужно определить средние значения на шести окружностях, что также делает формулу А.К.Маловичко неудобной при практическом ее применении.

В настоящее время этот факт, а именно отсутствие негромоздких удобных для практических вычислений способов определения вертикального градиента является основной причиной ограниченного применения этого вида преобразования поля на практике, ограниченного даже по сравнению с применением значений вторых вертикальных производных. Формулы для определения значений производной силы тяжести второго порядка гораздо проще и их можно получить непосредственно из уравнения Лапласа.

Глава 2. Учет значений вертикального градиента при высокоточных гравиметрических работах и возможности их применения при изучении процессов переноса масс в пластах.

При решении обратной задачи гравиразведки большое значение имеет знание вертикального градиента поля. Значения вертикального градиента можно использовать при определении параметров источников аномалий как самостоятельно, так и совместно с значениями исходного гравитационного поля.

Кроме того, значения вертикального градиента имеют и вспомогательное значение. Их применяют при определении поправки за аномальный вертикальный градиент.

В работе [6] показано, что, во-первых, аномалии вертикального градиента гравитационного поля на различных площадях могут достигать значительных величин (3000 Е и более), следовательно, их легко можно заметить и измерить, во-вторых, с их помощью легко можно обнаружить скомпенсированные в поле силы тяжести плотностные неоднородности геологического разреза. В работах [12,44] показана необходимость более точного учета вертикального градиента гравитационного поля при высокоточных работах.

В настоящее время отсутствует вертикальный градиентометр гравитационного поля, но работы по его разработке ведутся. Тем не менее значения вертикального градиента можно измерить с необходимой точностью путем измерения силы тяжести на разных высотах при помощи современных высокоточных гравиметров. Расчеты показывают, что такие измерения можно производить с точностью от 10 Е до 3 Е, с применением для наблюдений треноги высотой 3 м. Измерения вертикального градиента гравитационного поля должны сопровождать любые высокоточные гравиметрические съемки. Они совершенно необходимы при решении более тонких задач, связанных с изучением процессов переноса масс в

нефтегазовых пластах, когда значения поля измеряются с точностью до величины нескольких микрогал.

Известно, что точность практических вычислений вертикального градиента зависит и от точности определения значений исходного гравитационного поля. А эта точность в свою очередь зависит от погрешности учета поправок за высоту пунктов наблюдений и за аномальный вертикальный градиент на этапе определения аномалий силы тяжести. В связи с этим возникла необходимость анализа и вопросов определения указанных выше поправок, связанных с учетом вертикального градиента поля при высокоточных гравиметрических работах. Попутно рассматривается и связанная с ними задача применения вариаций вертикального градиента гравитационного поля при мониторинге процесса разработки месторождений нефти и газа. Для решения этой последней задачи необходимо определить и учесть как помех в виде поправки изменения гравитационного поля, связанные с изменениями плотности пластовых флюидов и водонасыщенных глинистых пород.

2.1. Учет поправки за высоту пунктов наблюдений при высокоточных гравиметрических работах.

В настоящем разделе рассматриваются вопросы необходимости и точности учета поправок за высоту пунктов наблюдений и за вертикальный аномальный градиент поля [55], возможности измерений вариаций вертикального градиента во времени и ряд других вопросов – все те вопросы применения вертикального градиента гравитационного поля, с которыми приходится иметь дело в основном при высокоточных гравиметрических съемках, проводимых с целью изучения приливных явлений в земной коре и неприливных вариаций силы тяжести, в частности, при контроле за эксплуатацией месторождений нефти и газа.

2.1.1. Определение поправки за высоту точки наблюдения.

Обозначим через W потенциал силы тяжести на поверхности земного сфериоида, \vec{n} – нормаль к уровенной поверхности потенциала, g – ускорение свободного падения, γ – нормальное значение силы тяжести, g_a – аномальное значение. При этих обозначениях получим [49]

$$g = \gamma + g_a , \quad (2.1)$$

$$\gamma = \frac{\partial W}{\partial n} ,$$

$$\frac{\partial g}{\partial n} = -\frac{\partial^2 W}{\partial n^2} + \frac{\partial g_a}{\partial n} . \quad (2.2)$$

Это выражение определяет вертикальный градиент ускорения свободного падения или силы тяжести. Первый член в правой части формулы учитывает значение нормального вертикального градиента силы тяжести, второй член – величину аномального вертикального градиента.

Для удобства примем:

$$-\frac{\partial^2 W}{\partial n^2} = \frac{\partial \gamma}{\partial n} = \delta g_\gamma, \frac{\partial g_a}{\partial n} = \delta g_\alpha .$$

Заменяя направление нормали \vec{n} на направление высоты пункта наблюдений H , из равенства (2.2) можно определить изменения гравитационного поля с высотой:

$$\Delta g = \delta g_\gamma H + \delta g_\alpha H . \quad (2.3)$$

Эта формула определяет наиболее полное значение поправки за высоту пунктов наблюдений.

В общем случае первый член правой части этого равенства определяется выражением [40]

$$\delta g_\gamma H = (0,30877 - 0,00044 \sin^2 \phi)H - 0,072 \cdot 10^{-6} H^2, \quad (2.4)$$

где ϕ - географическая широта пункта наблюдений.

Рассмотрим более подробно формулу (2.4). В ней, чтобы получить результат в миллигалах, значение высоты нужно брать в метрах. Она верна для малых высот вблизи поверхности Земли. При малых значениях высот третий член в ней является величиной малости второго порядка (по сравнению со значением сжатия Земли) и поэтому им можно пренебречь. Что же касается второго члена выражения (2.4), то при изменении угла на один градус величина поправки изменится не более чем на $1 \cdot 10^{-5}$ мГал. Поэтому никакого значения при локальных высокоточных съемках он не представляет. Но при больших изменениях широты его влияние нужно учесть при определении величины коэффициента

$$\delta g_\gamma = (0,30877 - 0,00044 \sin^2 \phi). \quad (2.5)$$

Применяемое сегодня значение этого коэффициента, равное 0,3086, получено отсюда при $\phi = 45^\circ$. При $\phi = 60^\circ$ (Московская область, чуть севернее г. Москвы) получим величину 0,3084, при $\phi = 80^\circ$ – 0,3083. Изменение величины этого коэффициента на 0,0002 при изменении величины этого коэффициента на 0,0002 при изменении высоты пункта наблюдений на 100 метров приведет к изменению силы тяжести на 0,02 мГал. А при больших высотах это изменение еще больше. Такие изменения уже необходимо учесть.

С учетом выражения (2.5) равенство (2.3) примет вид:

$$\Delta g = (0,30877 - 0,00044 \sin^2 \phi + \delta g_\alpha)H. \quad (2.6)$$

2.1.2. Учет значений аномального вертикального градиента.

Рассмотрим более подробно вопрос учета аномального вертикального градиента $\delta g_a = V_{zz}$. Оценим в начале возможные его значения на примерах тел правильной формы, наиболее часто применяемых на практике при решении указанных выше задач.

Выражения аномалий вертикального градиента силы тяжести от них [55] при $\delta g_a = V_{zz}$ приведены в таблице 2.1. Там же даны и выражения, определяющие максимальные значения этих производных. В таблице приняты следующие обозначения: h , h_1 и h_2 – глубины залегания центра или осевой линии, верхней и нижней границ тел; G – гравитационная постоянная,

$\lambda = \sigma S$ – линейная плотность, S – площадь сечения тела; μ – поверхностная плотность: $\mu = \sigma \Delta h$, Δh – мощность слоя.

Таблица 2.1

Выражения V_{zz} от модельных источников

№ п/п	Наименование источника поля	Выражение для V_{zz}	Выражение для максимального значения аномалии
1.	Бесконечная горизонтальная материальная линия (круговой цилиндр)	$2G\lambda \frac{h^2 - x^2}{(x^2 + h^2)^2}$	$\frac{2G\lambda}{h^2}$
2.	Бесконечная горизонтальная материальная полоса шириной $2l$	$2G\mu \left[\frac{x+l}{(x+l)^2 + h^2} - \frac{x-l}{(x-l)^2 + h^2} \right]$	$\frac{4G\mu l}{l^2 + h^2}$
3.	Бесконечная вертикальная материальная полоса при $h_1=h$, $h_2 \rightarrow \infty$	$2G\mu \frac{h}{x^2 + h^2}$	$\frac{2G\mu}{h}$

4.	Бесконечная горизонтальная материальная полуплоскость	$2G\mu \frac{x}{x^2 + h^2}$	$\frac{G\mu}{h}$
5.	Вертикальный контакт	$2G\sigma \left(\operatorname{arctg} \frac{h_2}{x} - \operatorname{arctg} \frac{h_1}{x} \right)$	$2G\sigma \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} \right)$
6.	Шар массы M	$GM \frac{2h^2 - x^2}{(x^2 + h^2)^{\frac{5}{2}}}$	$\frac{2GM}{h^3}$

Для анализа рассмотрим ниже только максимальные значения вертикального градиента от указанных тел при значении избыточной плотности $\sigma = 0,1 \text{ г/см}^3$.

1. Бесконечный горизонтальный круговой цилиндр.

$$V_{zz} = 41,9(R/h)^2. \quad (2.7)$$

При $R = mh$ отсюда получим

$$V_{zz} = 41,9m^2 (E), \quad (2.8)$$

где $m \leq 1$.

Здесь и ниже результат приводится в этвешах и в миллигалах на метр, если остальные размеры тела, например, $R, h, l, \Delta h$ выражены в тех же единицах. При $m=0,5$ отсюда получим

$$V_{zz} = 10,5E = 0,00105 \text{ мГал/м.}$$

Здесь учтено, что $1E = 10^{-4} \text{ мГал/м.}$

Максимальное значение градиента получим при $m=1$:

$$V_{zz} = 41,9E = 0,00419 \text{ мГал/м.}$$

2. Бесконечная горизонтальная материальная полоса.

$$V_{zz} = 26,7 \frac{\Delta h l}{l^2 + h^2}, \quad (2.9)$$

При $\Delta h=0,1$ км, $l=2$ км и $h=1$ км отсюда получим

$$V_{zz}=1,07E=0,0001 \text{ мГал/м.}$$

При $\Delta h=0,1$ км, $l=0,05$ км и $h=0,06$ км значение

$$V_{zz}=21,9E.$$

3. Бесконечная вертикальная материальная полоса (при $h_1=h$, $h_2 \rightarrow \infty$).

В этом случае

$$V_{zz} = 13,3 \frac{\Delta h}{h} E. \quad (2.10)$$

При $\Delta h=0,1$ км и $h=1$ км отсюда получим

$$V_{zz}=1,33E=0,0001 \text{ мГал/м.}$$

Когда h стремится к 0, значение v_{zz} будет стремиться к бесконечности. При $h=0,05$ км величина $v_{zz}=26,6E$.

4. Бесконечная горизонтальная материальная полу平面.

Из таблицы 2.1 получим

$$V_{zz} = 6,7 \frac{\Delta h}{h} E. \quad (2.11)$$

При $\Delta h=0,2$ км и $h = 1$ км

$$v_{zz}=1,34E=0,0001 \text{ мГал/м,}$$

т.е. получим такое же значение, что и выше в пункте 3. И в данном случае v_{zz} будет возрастать при h стремящемся к 0. Например, при $\Delta h=0,2$ км и $h=0,1$ км получим значение 13,4 Е.

5. Вертикальный контакт

$$V_{zz} = 13,3 \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} \right) E. \quad (2.12)$$

При $h_2/h_1=2$ отсюда получим

$$v_{zz}=4,4E=0,00044 \text{ мГал/м.}$$

Максимальное значение вертикального градиента получим в предельном случае, когда h_2 стремиться к бесконечности. В этом случае

$$V_{zz} = \pi G \sigma. \quad (2.13)$$

При $\sigma = 0,1 \text{ г/см}^3$ отсюда получим значение

$$V_{zz}=20,9E=0,00209 \text{ мГал/м.}$$

6. Шар

$$V_{zz} = 55,8 \left(\frac{R}{h} \right)^3 E. \quad (2.14)$$

Полагая $R=0,5h$, отсюда найдем

$$v_{zz}=6,98E=0,00070 \text{ мГал/м.}$$

При $R=h$ получим значение 55,8 Е.

Из рассмотренных примеров видно, что значение вертикального градиента поля силы тяжести может достигать 40-50 Е или величины 0,004-0,005 мГал/м. При $H=10$ м этим значением δg_a по формуле (2.6) будут соответствовать изменение силы тяжести $\Delta g = 0,04-0,05$ мГал, т.е. вполне ощутимые значения поля, которые необходимо учесть. Это при избыточной плотности $\sigma = 0,1$ г/см³. При больших значениях σ и Δh , а также для других более мощных источников поля получим еще больше величины изменения силы тяжести. Об этом свидетельствуют и данные работы [6]. Отсюда следует, что при высокоточных гравиметрических съемках рассматриваемой точности, направленных на поиски и разведку залежей нефти и газа, необходимо всегда учесть поправку за аномальный вертикальный градиент. Правда, об этом говорилось и писалось давно – еще в 1967 году Л.Д.Немцовым [44], но несмотря на современную более высокую точность аппаратуры, эту поправку не всегда учитывают на практике. Неучет поправки за аномальный вертикальный градиент приводит к скрытому увеличению погрешности определения аномальных значений силы тяжести, что в свою очередь приводит к появлению на картах гравитационного поля ложных аномалий.

Для определения величины этой поправки необходимо иметь карту аномалий вертикальной производной гравитационного поля. Такую карту можно построить, вычисляя соответствующими способами значения производной по картам аномалий силы тяжести или по данным непосредственных измерений вертикального градиента в разных точках площади.

Из изложенного материала видно, что в случаях высокоточных гравиметрических съемок при определении поправок за высоту точки наблюдений нужно пользоваться более общими формулами (2.4) и (2.6), учитывающими ее зависимость от широты точки наблюдений, а также нужно учесть поправку за аномальный вертикальный градиент.

2.2. Возможности применения вариаций вертикального градиента при изучении процессов переноса масс в пластах.

Возможности применения вариаций вертикального градиента при изучении явлений изменения массы в пластах рассмотрим на примере двух источников гравитационного поля разной формы – бесконечных горизонтальных кругового цилиндра и материальной полосы. Рассмотрим только выражения для максимальных значений аномалий $v_z(x)$ и ее вертикального градиента $v_{zz}(x)$, которые наблюдаются при $x=0$ (табл. 2.1):

1. Бесконечный горизонтальный круговой цилиндр

$$V_z(0) = \frac{2G\lambda}{h}, \quad (2.15)$$

$$V_{zz}(0) = \frac{2G\lambda}{h^2}; \quad (2.16)$$

2. Бесконечная горизонтальная материальная полоса

$$V_z(0) = 4G\mu \operatorname{arctg} \frac{l}{h}, \quad (2.17)$$

$$V_{zz}(0) = 4G\mu \operatorname{arctg} \frac{l}{l^2 + h^2}. \quad (2.18)$$

Выше было показано, что данные источники могут вызывать на поверхности земли значения поля V_{zz} , превышающие в несколько раз погрешности наблюдений. Выражения (2.15) и (2.17) используются в настоящее время в качестве моделей поля при изучении вариаций силы

тяжести на практике. Поэтому анализ возможных значений аномалий V_z и V_{zz} по амплитуде здесь не рассматривается. Рассмотрим только когда и при каких значениях параметров l и h имеет смысл применять вариации вертикального градиента при изучении процессов переноса массы в пластах [57].

Прежде всего, рассмотрим выражения (2.15) и (2.16). Получаемые по ним значения и в первом и во втором случаях являются возрастающими при уменьшении глубины залегания источника, причем значения V_{zz} возрастают быстрее, чем V_z и тем сильнее, чем меньше h . Отсюда следует, что вариациями вертикального градиента можно пользоваться при значениях $h \leq 1\text{км}$ и особенно при изучении явлений переноса масс в приповерхностных слоях при h стремящемся к нулю, например, при определении положения грунтовых вод, изучения обводнения пластов и др.

Рассмотрим теперь выражения (2.17) и (2.18). И в данном случае аномалии, определяемые по ним, растут при уменьшении h , но только до определенного предела. Максимальное увеличение, соответствующее при конечном l значению $h=0$, составляет для равенства (2.17)

$$V_z(0) = 4\pi G\mu , \quad (2.19)$$

для равенства (2.18) –

$$V_{zz}(0) = \frac{4G\mu}{l} . \quad (2.20)$$

Более подробный анализ показывает, что при постоянном значении поверхности плотности источника выражение (2.18) определяет возрастающую функцию при увеличении l , но только до значения $l=h$. При дальнейшем увеличении l функция (2.18) является убывающей. Поэтому этим выражением лучше всего пользоваться только до $l=h$. При малых

глубинах h , как видно из равенства (2.20), появляется более сильная зависимость от l – чем меньше l , тем больше значения вертикального градиента силы тяжести.

Из рассмотренного анализа выражений (2.16) и (2.18) видно, что для изучения процессов переноса массы в нефтегазовых пластах при контроле за эксплуатацией месторождений, вариациями вертикального градиента силы тяжести можно пользоваться и лучше всего пользоваться ими при малых глубинах залегания слоев и на начальном этапе обводнения пластов (при малых l).

Одновременное совместное использование вариаций силы тяжести и ее вертикального градиента расширяет возможности решения задач, позволяет получать более надежные сведения о процессах изменения массы в пластах и особенно в пределах закрытых территорий. Например, поделив выражение (2.15) на (2.16), сразу же можно определить глубину залегания пласта, с которым связано изменение вариаций гравитационного поля. Из выражений (2.17) и (2.18) можно определить отношение l к h .

Из изложенного материала видно, что над источниками гравитационного поля могут наблюдаться значения вертикального градиента, по амплитуде превышающих погрешности измерений в несколько раз. При малых глубинах залегания источников вариации вертикального градиента могут быть более интенсивными, чем вариации исходного гравитационного поля. Поэтому их измерение представляет определенный интерес.

2.3. Определение гравитационного влияния от изменений масс в пластах при снижении пластового давления.

При повторных гравиметрических работах, которые ведутся с высокой точностью до нескольких долей миллигал, необходимо учесть любые эффекты, связанные с изменениями масс в пластах под площадью наблюдений. Особенно это важно при контроле за эксплуатацией месторождений нефти и газа.

В данном разделе рассматриваются гравитационные влияния от изменения масс в пластах нефтегазовых месторождений, которые происходят в процессе изменения давления в зонах нахождения пластового флюида и глинистых водонасыщенных пород. В процессе такого воздействия меняется плотность пластового флюида (нефть, вода) за счет его сжатия или расширения, а также плотность водонасыщенных глинистых пород из-за изменения объема их порового пространства [65]. Оценим величину и характер изменения гравитационных эффектов, связанных с этими явлениями и рассмотрим методику такой оценки [54, 56].

2.3.1. Изменения плотности пластового флюида и водонасыщенных глинистых пород.

2.3.1.1. Зависимость плотности пластового флюида от давления

Рассмотрим случай неустановившегося движения упругой жидкости в пористой среде, связанного с пуском скважин или с изменением темпов отбора флюидов из них. Во всех случаях при снижении пластового давления объем порового пространства сокращается, а объем сжатой жидкости увеличивается, что приводит к уменьшению ее плотности. Все это способствует вытеснению жидкости из пласта в скважину.

Плотность капельной жидкости в пластах (нефть, вода) меняется по закону [8]:

$$\rho = \rho_0 [\exp \beta_{\text{ж}} (P - P_0)], \quad (2.21)$$

где – P и P_0 – текущее и начальное значения давления в пласте, $\beta_{\text{ж}}$ – коэффициент объемного сжатия, ρ_0 – начальное значение плотности жидкости.

При малых значениях перепада давления показатель степени в формуле (2.21) является малой величиной. Поэтому, разлагая экспоненту в формуле (2.21) в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами ряда, получим линейную зависимость плотности от давления:

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta_{\text{ж}} \Delta P), \quad (2.22)$$

где – перепад давления $P=P-P_0$.

Изменение плотности флюида под воздействием давления для равенств (2.21) и (2.23) можно определить из следующих выражений:

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = \rho_0 [\exp(\beta_{\text{ж}} \Delta P) - 1], \quad (2.23)$$

$$\Delta\rho = \rho_0 \beta_{\text{ж}} \Delta P. \quad (2.24)$$

Рассмотрим более подробно формулу (2.23). Коэффициент объемного сжатия жидкости $\beta_{\text{ж}}$ для нефти и пластовых вод составляет соответственно [8]:

$$\beta_{\text{н}} = (7 \div 30) \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1},$$

$$\beta_{\text{в}} = (2,7 \div 5) \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}.$$

Для примера примем

$$\beta_{\text{н}} = 20 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1},$$

$$\beta_{\text{в}} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}.$$

Исходные значения плотностей ρ_0 : для нефти $0,8 \text{ г/см}^3$, для воды 1 г/см^3 .

Для этих значений параметров по формуле (2.23) найдем изменения плотностей нефти и воды в зависимости от различных значений перепада давления $\Delta P=P-P_0$ (рис 2.1, табл. 2.2)

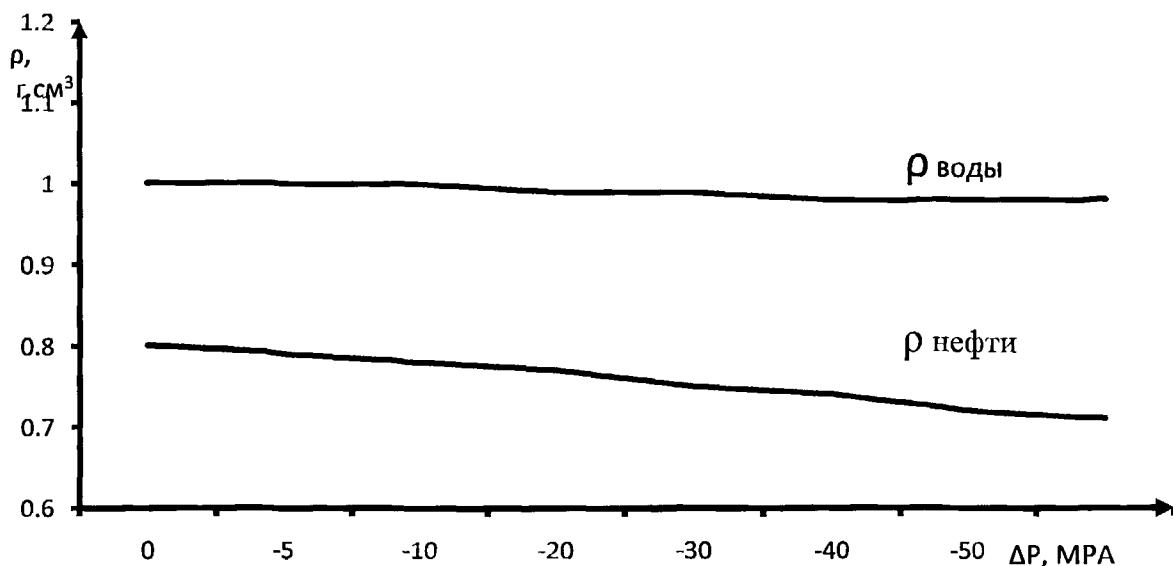


Рис 2.1

Таблица 2.2

Изменение плотности пластового флюида в зависимости от давления

ΔP (МПа)	Нефть		Вода	
	ρ (г/см ³)	$\Delta \rho$	ρ (г/см ³)	$\Delta \rho$
0	0,80	0	1,00	0
-5	0,79	-0,01	1,00	0
-10	0,78	-0,02	1,00	0
-20	0,77	-0,03	0,99	-0,01
-30	0,75	-0,05	0,99	-0,01
-40	0,74	-0,06	0,98	-0,02
-50	0,72	-0,08	0,98	-0,02
-60	0,71	-0,09	0,98	-0,02

При расчетах учтено, что пластовое давление снижается, то есть величина ΔP является отрицательной величиной.

Изменение плотности, связанное с увеличением объема нефти, намного больше, чем у воды (см. табл.2.2). Анализ выражений (2.23) и (2.24)

показывает, что расчеты по ним почти совпадают друг с другом до значений 40 – 50 МПа. Поэтому на практике можно пользоваться более простым равенством (2.24).

2.3.1.2. Зависимость плотности водонасыщенных осадочных пород от давления.

Рассмотрим изменение плотности водонасыщенных осадочных пород из-за уменьшения их пористости при снижении пластового давления.

Такое изменение плотности может происходить в зависимости от изменения пористости, а как известно коэффициент пористости зависит от значений пластового давления.

Предположим, что пористость породы в зависимости от давления меняется по линейному закону [8]:

$$m = m_0 + \beta_c (P - P_0), \quad (2.25)$$

где m_0 – коэффициент пористости, соответствующий давлению P_0 , β_c – коэффициент объемной упругости пласта. Наиболее вероятные значения составляют $(0,3 - 2) 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Изменение коэффициента пористости при изменении давления от величины P_0 до P составит

$$\Delta m = m - m_0 = \beta_c (P - P_0). \quad (2.26)$$

От изменения пористости перейдем к изменению плотности. Плотность водонасыщенных пород определяется формулой

$$\sigma_n = (1 - m)\sigma + m\rho_b = \sigma - m(\sigma - \rho_b),$$

где σ – плотность твердой фазы породы, ρ_b – плотность пластовой воды.

Отсюда изменение плотности породы из-за наличия в ней насыщенных водой пор можно определить из выражения

$$\Delta\sigma = \sigma_n - \sigma = -m(\sigma - \rho_{\text{в}}). \quad (2.27)$$

Изменению коэффициента пористости на величину Δm будет соответствовать изменение плотности

$$\delta\Delta\sigma = -(\sigma - \rho_{\text{в}})\Delta m. \quad (2.28)$$

Знак минус в этой формуле указывает на то, что с увеличением пористости увеличивается жидккая фаза пласта, что приводит к уменьшению плотности.

Подставляя сюда Δm из равенства (2.26) получим

$$\delta\Delta\sigma = -(\sigma - \rho_{\text{в}})\beta_c \Delta P, \quad (2.29)$$

где $\Delta P = P - P_0$.

Эта формула выражает изменение плотности, связанное с изменением пористости в зависимости от давления.

2.3.2. Гравитационное поле, связанное с изменением плотности пластового флюида и водонасыщенных глинистых пород.

1. Гравитационное поле, связанное с изменением плотности пластового флюида.

Рассмотрим вначале изменение гравитационного поля, связанное с изменением плотности флюида. Гравитационное влияние пластовой воды можно заменить влиянием бесконечной горизонтальной материальной полосы [49]:

$$V_z(x) = 2G\mu \left(\operatorname{arctg} \frac{x+l}{h} - \operatorname{arctg} \frac{x-l}{h} \right), \quad (2.30)$$

где G – гравитационная постоянная, l - половина ширины полосы, h – глубина ее залегания, поверхностная плотность

$$\mu = \Delta\rho \Delta h, \quad (2.31)$$

где $\Delta\rho$ - величина изменения плотности воды в пласте, Δh – суммарная мощность водоносных слоев пласта на участке изменения давления.

Используя выражения (2.24) и (2.31) для максимального значения аномалии из равенства (2.30) получим

$$V_z(0) = 4G\rho_0 \beta_{\text{ж}} \Delta h \Delta P \operatorname{arctg} \frac{l}{h}. \quad (2.32)$$

Принимая для воды $\rho_0=1 \text{ г/см}^3$, $\beta_{\text{ж}} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, найдем

$$V_z(0) = 10,67 \cdot 10^{-6} \Delta h \Delta P \operatorname{arctg} \frac{l}{h}. \quad (2.33)$$

Здесь, что бы получить V_z в миллигалах, нужно брать Δh в метрах, а ΔP – в МПа.

Выражение (2.32) определяет максимальное значение гравитационной аномалии, вызванной изменением плотности воды в пласте в зависимости от изменения давления на величину ΔP .

Если суммарная мощность водоносных пластов составляет 100 м, а перепад давления $\Delta P=40 \text{ МПа}$, то из равенства (2.33) получим

$$V_z(0) = 4,27 \cdot 10^{-2} \cdot \operatorname{arctg} \frac{l}{h} (\text{мГал}). \quad (2.34)$$

Оценим зависимость от глубины залегания этого выражения при половине ширины пласта $l=2 \text{ км}$. Полученные значения, увеличенные в 100 раз, приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3.

Гравитационное поле, связанное с изменением плотности воды

h (км)	0	0,1	0,5	1	2	3	5
$V_z(0)$ 100(мГал)	6,70	6,49	5,68	4,74	3,37	2,52	1,62

Отсюда видно, что при выбранных параметрах изменение гравитационного поля может достигать значения 0,067 мГал, которое можно измерить и учесть.

При снижении пластового давления плотность жидкости уменьшается из-за увеличения ее объема. Поэтому получаемые значения гравитационного поля являются отрицательными.

Влияние нефтеносной части пласта в области залежи также можно аппроксимировать двухмерной горизонтальной полосой, но с переменной поверхностной плотностью. На границах полосы плотность равна нулю, к центру она увеличивается и достигает максимального значения в центре залежи. В такой конструкции переменная в горизонтальном направлении массы нефти залежи сконденсирована с переменной плотностью на горизонтальную плоскость. Такая модель является хорошей аппроксимацией пологих волообразных поднятий различных типов.

В нашем случае примем, что залежь является симметричной, массу нефти в ней можно сконденсировать на горизонтальную плоскость с линейным законом изменения поверхностной плотностью от краев к центру. При этом полагаем, что среднее значение плотности (половина максимального значения) рано величине изменения плотности нефти в пласте под влиянием давления.

Согласно предложенному, максимальное значение поверхностной плотности и закон ее изменения от крыльев складки к центру, запишем в виде

$$\mu = 2\Delta\rho \Delta h, \quad (2.35)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 + \frac{\mu_0}{l}\xi, & -l \leq \xi \leq 0, \\ \mu_0 - \frac{\mu_0}{l}\xi, & 0 \leq \xi \leq l \end{cases}, \quad (2.36)$$

где l – половина ширины нефтеносной части пласта.

Тогда при глубине залегания полосы h , имея в виду выражение [49],

$$dV_z = 2Gh \frac{\mu d\epsilon}{(x-\epsilon)^2 + h^2},$$

для определения значений гравитационной аномалии получим

$$\begin{aligned} V_z(x) &= 2G\mu_0 H \left[\int_{-l}^0 \frac{1 + \frac{\xi}{l}}{(x - \xi)^2 + h^2} d\xi + \int_0^l \frac{1 - \frac{\xi}{l}}{(x - \xi)^2 + h^2} d\xi \right] = \\ &= \frac{2G\mu_0 h}{l} \left[\frac{x+l}{h} \operatorname{arctg} \frac{x+l}{h} + \frac{x-l}{h} \operatorname{arctg} \frac{x-l}{h} - 2 \frac{x}{h} \operatorname{arctg} \frac{x}{h} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \ln \frac{(x^2 + h^2)^2}{[(x+l)^2 + h^2][(x-l)^2 + h^2]} \right]. \end{aligned} \quad (2.37)$$

При $x = 0$ получим

$$V_z(0) = \frac{2G\mu_0 h}{l} \left[2 \frac{l}{h} \operatorname{arctg} \frac{l}{h} + \ln \frac{h^2}{l^2 + h^2} \right]. \quad (2.38)$$

Учитывая равенство (2.35), при $l/h = \beta$ выражение (2.38) можно переписать в виде

$$V_z(0) = 4G\Delta\rho\Delta h \left[2\operatorname{arctg}\beta - \frac{1}{\beta} \ln(\beta^2 + 1) \right]. \quad (2.39)$$

Подставляя сюда выражение для $\Delta\rho$ из равенства (2.24), окончательно получим

$$V_z(0) = 4G\rho_0 \beta_{ж} \Delta P \Delta h \left[2\operatorname{arctg}\beta - \frac{1}{\beta} \ln(\beta^2 + 1) \right]. \quad (2.40)$$

Эта формула определяет максимальное значение гравитационного поля, вызванного изменением плотности нефти в результате ее расширения при снижении пластового давления.

Оценим величину изменения гравитационного поля в зависимости от глубины залегания при следующих значениях постоянных для области нахождения в пласте нефти: $\rho_0 = 0,8 \text{ г/см}^3$, $\beta_{ж} = \beta_{н} = 20 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, $\Delta P = 40 \text{ МПа}$, суммарная мощность нефтеносных пластов $\Delta h = 30 \text{ м}$, значение $l = 1,5 \text{ км}$.

При этих значениях параметров получим

$$V_z(0) = 5,12 \cdot 10^{-2} \left[2\operatorname{arctg}\beta - \frac{1}{\beta} \ln(\beta^2 + 1) \right]. \quad (2.41)$$

Это выражение определяет аномалию в миллигалах. Полученные из него значения при $\beta = 1,5/h$ приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Гравитационное поле, связанное с изменением плотности нефти

h (км)	0,1	0,5	1	2	3	4	5
$V_z(0) 100$ (мГал)	13,52	8,87	6,01	3,53	2,43	1,89	1,50

Гравитационный эффект, вызванный изменением плотности в зависимости от изменения давления может достигать величины 0,1 мГал (см.табл. 2.4). Эту величину гравитационного поля вполне можно измерить. В формуле (2.40) величина ΔP при снижении пластового давления является отрицательной величиной. Поэтому гравитационный эффект также является отрицательным.

Гравитационные влияния, связанные с изменением плотности нефти и пластовой воды, будут складываться в зависимости от того, как расположены в пластах зоны нахождения нефти и подстилающей ее воды. От этого рассматриваемый эффект может быть еще больше.

2. Гравитационное поле, связанное с изменением плотности глинистых пород

Оценим гравитационное влияние, связанное с изменением пористости пород в пластах под действием давления. Такую оценку также можно произвести по формуле (2.40) с учетом выражения (2.39). При этом поверхностная плотность

$$\mu = \delta \Delta \sigma \cdot \Delta h = (\sigma - \rho_v) \beta_c \Delta h \cdot \Delta P . \quad (2.42)$$

Заменяя в равенстве (2.30) значение μ на это выражение, при $x = 0$ получим

$$V_z(0) = 4G(\sigma - \rho_v) \beta_c \Delta h \cdot \Delta P \operatorname{arctg} \frac{l}{h} . \quad (2.43)$$

При $\sigma = 2,3 \text{ г/см}^3$, $\rho_b = 1 \text{ г/см}^3$, $\beta_c = 1 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Отсюда найдем

$$V_z(0) = 3,47 \cdot 10^{-6} \Delta h \cdot \Delta P \cdot \operatorname{arctg} \frac{l}{h}. \quad (2.44)$$

Здесь результат получим в миллигалах, если выразить Δh в метрах, а ΔP – в МПа. При общей суммарной мощности водонасыщенных пород $\Delta h=100 \text{ м}$ и $\Delta P=40 \text{ МПа}$, отсюда найдем

$$V_z(0) = 1,39 \cdot 10^{-2} \operatorname{arctg} \frac{l}{h}. \quad (2.45)$$

Полученные по этой формуле значения гравитационного поля при $l=2 \text{ км}$ приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Гравитационное поле, связанное с изменением плотности глинистых пород

$h \text{ (км)}$	0	0,1	0,5	1	2	3	5
$V_z(0) \text{ 100 (мГал)}$	2,18	2,11	1,85	1,54	1,10	0,82	0,53

В этом случае (см. табл. 2.5) гравитационный эффект может достигать 0,02 мГал, то есть до вполне ощутимых величин. При снижении пластового давления происходит уменьшении пористости водонасыщенных глинистых пород из-за уменьшения их порового пространства, что приводит к

увеличению их плотности, следовательно, к уплотнению. Поэтому получаемый эффект является положительным.

В рассмотренном примере в качестве мощности глинистых пород взята величина $\Delta h = 100$ м (на практике эта величина может быть в несколько раз больше). Во столько же раз увеличится и гравитационное влияние, связанное с уплотнением пород.

Рассмотренные гравитационные эффекты, связанные с изменением плотности водонасыщенных глинистых пород и пластового флюида могут происходить в отдельности и вместе. Причем в последнем случае они могут происходить с разными знаками, например, в случае снижения пластового давления в результате эксплуатации месторождений, рассмотренного выше, и с одним знаком, когда происходит одновременно уплотнение глинистых пород и сжатие пластового флюида.

Если воспользоваться одной и той же моделью пласта, например формулой (2.30) или (2.37), то суммарное изменение поверхностной плотности слоев, если они расположены симметрично под началом координат, можно определить с учетом равенств (2.24) и (2.29) и знаков гравитационных влияний по формуле

$$\begin{aligned}\mu &= (\delta\Delta\sigma \pm \Delta\rho_B)\Delta h_1 \pm \Delta\rho_H\Delta h_2 = \\ &= \{[(\sigma - \rho_B)\beta_c \pm \rho_B\beta_B] \Delta h_1 \pm \rho_H\beta_H\Delta h_2\} \Delta\rho ,\end{aligned}\tag{2.46}$$

где Δh_1 и Δh_2 – соответственно мощности водонасыщенных и нефтенасыщенных слоев пород, индексы v и H указывают на случаи жидкой фазы – воды и нефти, знаки плюс и минус соответствуют случаям сжатия и расширения жидкости.

Принимая

$$\begin{aligned}\rho_{\text{в}} &= 1 \text{ г/см}, \quad \rho_{\text{н}} = 0,8 \text{ г/см}, \\ \beta_{\text{в}} &= 4 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}, \quad \beta_{\text{н}} = 20 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}, \\ \beta_{\text{c}} &= 1 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1},\end{aligned}$$

для произведения $G\mu$, получим

$$G\mu = \frac{2}{3}[(\sigma + 3)\Delta h_1 + 16\Delta h_2]10^{-6}\Delta P. \quad (2.47)$$

При расчетах гравитационного поля, чтобы получить результат в миллигалах, необходимо брать σ в г/см^3 , Δh – в метрах, ΔP – в МПа.

Из всех рассмотренных причин на гравитационное поле больше всего оказывается изменение плотности нефти из-за ее расширения, так как коэффициент объемного сжатия нефти в несколько раз больше такого же коэффициента для воды и почти в 10 раз больше, чем коэффициент объемной упругости пласта.

При снижении пластового давления, как было отмечено, уменьшается объем пор глинистых пород, увеличивается объем жидкости. Количество освободившейся жидкости при упругом режиме эксплуатации месторождений извлекается на поверхность через скважину. Что же касается водонасыщенных глинистых пород то при снижении пластового давления они уплотняются, уменьшается объем порового пространства, увеличивается плотность пород из-за уменьшения жидкой фазы в порах. Вытесненная из пор жидкость также извлекается на поверхность.

Суммарное гравитационное влияние, связанное с эффектами расширения объема жидкости и уменьшения объема пор пород, можно определить и через массу извлеченной на поверхность жидкости,

распределив ее на глубине залегания пласта, придав ей соответствующую форму.

Получаемые значения гравитационного поля в общем виде являются функциями времени.

При повторных гравиметрических работах, когда определяется положение границы водонефтяного контакта с целью контроля за обводнением скважин, поля, вызываемые рассмотренными выше причинами, являются мешающими. Поэтому их нужно определить и учесть как помехи в виде поправок.

2.3.3. Изменения значений вертикального градиента, связанные с изменениями плотности пластового флюида и водонасыщенных глинистых пород

1. Случай пластовой воды

Рассмотрим более общий случай гравитационной модели горизонтального пласта – формулу (2.30). Максимальное значение вертикального градиента для этой модели можно определить по двум формулам, полученным из равенства (2.30):

$$V_{zz}(0) = 4G\mu \frac{l}{l^2 + h^2} , \quad (2.48)$$

$$V_{zz}(0) = V_z(0) \frac{l}{(l^2 + h^2) \operatorname{arctg} \frac{l}{h}} . \quad (2.49)$$

Здесь вторая формула определяет значения вертикального градиента через максимальное значение исходного гравитационного поля.

Рассмотрим формулу (2.48). Определяя из выражений (2.24) и (2.31) значение плотности, найдем

$$V_{zz}(0) = 4G\rho_0 \beta_* \Delta h \Delta P \frac{l}{l^2 + h^2} . \quad (2.50)$$

При тех же значениях параметров, что и выше, аналогично формуле (2.34) получим

$$V_{zz}(0) = 4,27 \cdot 10^{-2} \frac{l}{l^2 + h^2} . \quad (2.51)$$

Если брать здесь l и h в километрах, то результат получим в мГал/км. Учитывая, что $1 \text{ мГал/км} = 10E$, найдем

$$V_{zz}(0) = 0,43 \frac{l}{l^2 + h^2} . \quad (2.52)$$

При $l \rightarrow 0$ и $h \rightarrow 0$ значения $V_{zz}(0)$ стремятся к бесконечности. Для примера примем $h = 0,01$ км. Найденные по формуле (2.52) значения вертикального градиента поля в зависимости от изменения l приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6.

Значения вертикального градиента, связанные с изменением плотности воды

l (км)	0,01	0,05	0,10	0,2	0,3	0,5
$V_{zz}(0)$ (E)	21,5	8,3	4,2	2,2	1,4	0,9

Если учесть, что погрешность измерения вертикального градиента может равняться $3 E$, то его значения больше $4 E$, имеющие место при $l \leq 0,2$ км, вполне измеримы. Из таблицы видно, что изменения вертикального градиента, связанные с изменением плотности воды могут

быть больше 20 Е и вполне ощутимы. Поэтому при малых значениях l и h вариации вертикального градиента можно успешно использовать при изучении процессов переноса масс в пластах. Аналогичные результаты можно получить и по формуле (2.49), только нужно применить ее к данным таблицы 2.3.

2. Влияние изменения плотности нефти.

Рассмотрим случай, связанный с изменением плотности нефти. Для определения возможных пределов изменения вертикального градиента возьмем тот же пример, которому соответствуют данные таблицы 2.4. При тех же значениях параметров изменения вертикального градиента приближенно можно определить по формуле (2.49), подставляя в нее значения $V_z(0)$ из таблицы 2.4. Найденные значения вертикального градиента приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7.

Значения вертикального градиента, связанные с изменением плотности нефти

h (км)	0,1	0,5	1	2	3	4	5
$V_{zz}(0)$ (Е)	59,8	42,6	28,3	13,0	7,7	4,1	2,8

Из таблицы видно, что значения вертикального градиента при малых числах h может достигать 60 Е при погрешности измерения ± 3 Е. Отсюда следует, что значения вариаций вертикального градиента, связанные с изменением плотности нефти являются вполне ощутимыми и легко могут быть зарегистрированные современными приборами.

3. Случай водонасыщенных глинистых пород.

В этом случае аналитическое выражение для определения значений вертикального градиента можно получить таким же путем, как была получена выше формула (2.52). Другой более простой путь, равносильный

этому, - получение выражения прямым дифференцированием из равенства (2.45).

Беря производную по h от обеих частей этого равенства, меняя знак перед выражением и переходя от единицы мГал/км к этвешу, получим

$$V_{zz}(0) = 0,14 \frac{l}{l^2 + h^2}. \quad (2.53)$$

Коэффициент в этой формуле соответствует тем же параметрам, что и в формуле (2.45). Чтобы получить значения вертикального градиента по формуле (2.53) в этвешах, значения l и h нужно брать в километрах.

Значения вертикального градиента, полученные из равенства (2.53) при $h = 0,01$ км, приведены ниже в таблице 2.8.

Таблица 2.8.

**Значения вертикального градиента, связанные с изменением плотности
водонасыщенных глинистых пород**

l (км)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1
$V_{zz}(0)(E)$	7,0	5,6	4,2	3,3	2,7	1,4

Отсюда видно, что значения вертикального градиента, связанные с изменением плотности водонасыщенных глинистых пород меняются достаточно мало и достигают небольших величин. Они проявляются только при малых параметрах l и h . Поэтому практического интереса не представляют.

Таким образом, из рассмотренных трех случаев реальное значение имеют только первые два, а именно, изменения плотности пластового флюида (нефти и воды). Из этих двух случаев более сильное влияние на вертикальный градиент поля имеет случай изменения плотности нефти. В этих двух случаях значения вертикального градиента гравитационного поля может превышать уровень помех и погрешности измерения в три – пять и более раз и их успешно можно измерить. Поэтому при практических

гравиметрических работах одновременно с измерением ускорения силы тяжести необходимо измерить и значения вертикального градиента поля. При этом совместный анализ значений вариаций исходного гравитационного поля и его вертикального градиента позволит получать более надежные сведения об изучаемых явлениях в нефтегазовых пластах.

Из изложенного материала следует:

1. Изменение плотности пластового флюида и водонасыщенных глинистых пород при снижении пластового давления в результате эксплуатации месторождений может привести к изменению гравитационного поля и его вертикального градиента до вполне ощутимых значений.

2. На значения гравитационного поля более сильное влияние оказывает изменение плотности нефти по сравнению с изменениями плотности пластовой воды и водонасыщенных глинистых пород. При этом изменения плотности глинистых пород на значения вертикально градиента поля практического влияния не оказывает.

3. Предложенную методику оценки гравитационного влияния связанную с указанными причинами, можно применить в случаях различного геологического строения при различных режимах эксплуатации месторождений, приводящих к изменению пластового давления, например, при упругом и упруговодонапорном режимах эксплуатации. Ее можно применить при решении различных задач, в частности, при определении зон возможных проседаний слоев геологического разреза, возникающих в результате эксплуатации месторождений, положения границы водонефтяного контакта при контроле за обводнением скважин. При решении этих задач, связанных с переносом масс в пластах, рассмотренные в данном разделе гравитационные эффекты исходного поля и его вертикального градиента являются помехами и их необходимо измерить и исключить в виде поправок из аномалий вариаций силы тяжести и его вертикального градиента получаемых при повторных гравиметрических съемках.

На результатах исследований данной главы основано первое защищаемое положение работы.

Глава 3. Определение формы и параметров источников гравитационного поля с использованием аномалий вертикального градиента

Повышению эффективности интерпретации гравитационных данных во многом зависит от привлечения к ней значений вертикальных производных силы тяжести первого и второго порядков. Производные поля первого порядка или значения вертикального градиента ближе к значениям исходного гравитационного поля и сохраняют в менее искаженном и более читаемом виде информацию об источниках поля, чем значения вертикальной производной второго порядка. В то же время их трудно вычислять.

Аномалии вертикальной производной второго порядка на картах являются более сложными, более изрезанными и потому трудно читаемыми. Происходит это из-за того, что на картах появляются в большей степени ложные аномалии, связанные с более глубокими минимумами кривых вторых производных силы тяжести. Кроме того, чем выше порядок производной, тем выше и погрешности вычислений. С другой стороны, их легче вычислять.

Практически целесообразно при интерпретации и при выделении локальных аномалий использовать на первом этапе значения вертикального градиента поля. На втором этапе, если есть на это необходимость, нужно применять значения производных второго порядка, например, при разделении аномалий от близко расположенных в горизонтальном направлении источников поля.

В данной главе дано описание разработанных способов совместной интерпретации вертикального градиента с значениями исходного гравитационного поля и других его элементов. Применение этих способов помогут шире вовлечь в процесс интерпретации значений вертикального градиента. Кроме того, и, самое главное, совместная интерпретация аномалий силы тяжести и ее вертикальной составляющей позволяет решать

ряд новых задач, например, определение формы источников поля, делает возможным получение более достоверных и надежных сведений о геометрии и месторождении аномальных тел. Знание формы источников поля приводит к уменьшению неоднозначности решения обратной задачи гравиразведки.

3.1. Интерпретация аномалий по совместному анализу значений вертикальной и горизонтальной производных гравитационного поля.

Рассмотрим разработанные способы совместной интерпретации значений вертикальной и горизонтальной производных гравитационного поля. Способов несколько, они основаны как на применении горизонтальных координат характерных точек кривых производных, так и на применении их интегральных характеристик.

3.1.1. Применение значений горизонтальных координат характерных точек аномалий V_{xz} и V_{zz}

Предлагаемые способы совместной интерпретации значений производных первого порядка гравитационного поля V_{xz} и V_{zz} основаны на применении функций [57]

$$d = \frac{(x_{\min})V_{zz}}{(x_0)V_{zz}} , \quad (3.1)$$

$$d_1 = \frac{(x_0)V_{zz}}{(x_e)V_{xz}} , \quad (3.2)$$

где x_0 и x_{\min} – горизонтальные координаты точек перехода через нуль и минимального значения аномалии V_{zz} , x_e – координата максимального или минимального значения производной V_{xz} (берется значение модуля) – рис. 3.1.

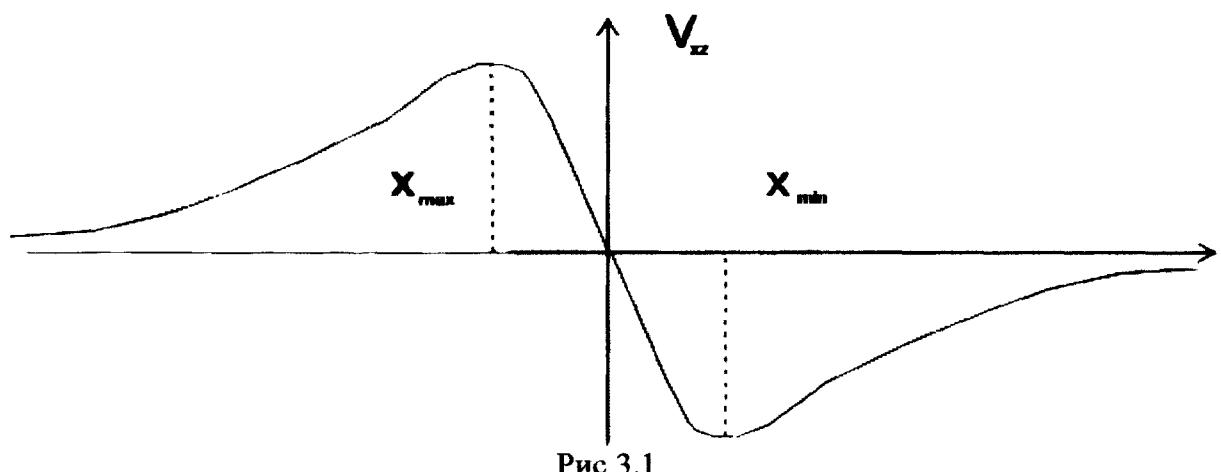
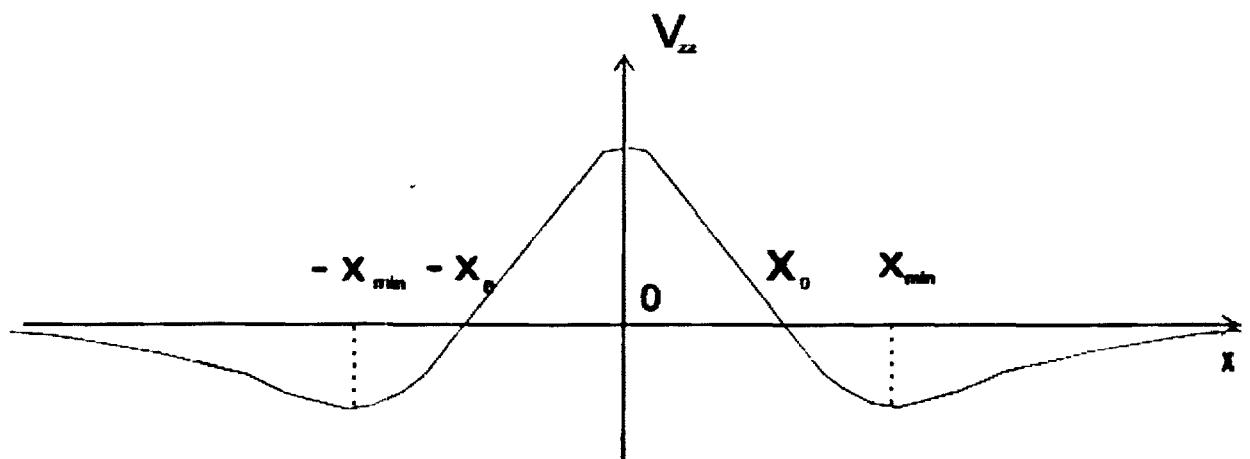
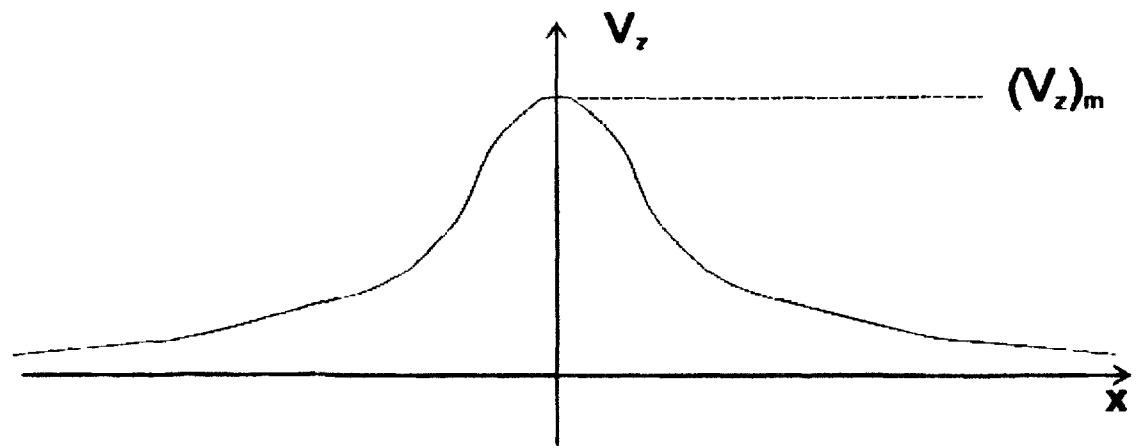


Рис 3.1

Формула (3.1) соответствует только аномалии вертикальной производной. Выражение (3.2) позволяет вести совместную интерпретацию значений вертикальной и горизонтальной производных гравитационного поля.

Полученные аналитические выражения функций d и d_1 для основных тел правильной формы приведены ниже [57]. Здесь же приведены и значения координат x_0 , $x_{m;n}$ и x_e [49, 51].

1. Бесконечная горизонтальная материальная линия (круговой цилиндр):

$$x_0 = h, x_{min} = \sqrt{3} h; x_m = \frac{h}{\sqrt{3}},$$

$$d = d_1 = \sqrt{3}. \quad (3.3)$$

Отсюда видно, что обе эти функции определяются одним и тем же постоянным числом.

2. Бесконечная горизонтальная материальная полоса

$$x_0 = \sqrt{l^2 + h^2},$$

$$x_{min} = \sqrt{2h\sqrt{l^2 + h^2} + l^2 + h^2},$$

$$x_{max} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{2\sqrt{l^4 + l^2h^2 + h^4} + l^2 + h^2},$$

$$d = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{m^2 + 1}} + 1}, \quad m = \frac{l}{h}; \quad (3.4)$$

$$d_1 = \frac{\sqrt{3} \sqrt{m^2 + 1}}{\sqrt{2 \cdot \sqrt{m^4 + m^2 + 1} + m^2 - 1}}. \quad (3.5)$$

Обе эти функции начитаются с одного и того же значения равного корню из трех, соответствующего также горизонтальной линии. При m , стремящемся к бесконечности, значения d равно d_1 и стремится к единице.

3. Бесконечная вертикальная материальная полоса.

Значения рассматриваемых горизонтальных координат определяются выражениями

$$x_0 = \sqrt{h_1 h_2},$$

$$x_{\min} = \sqrt{(h_1 + h_2) \sqrt{h_1 h_2} + h_1 h_2},$$

$$x_{\max} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{\sqrt{(h_1^2 + h_2^2)^2 + 12h_1^2 h_2^2} - (h_1^2 + h_2^2)};$$

Функции

$$d = \sqrt{\frac{k+1}{\sqrt{k}} + 1}, k = \frac{h_2}{h_1}, \quad (3.6)$$

$$d_1 = \frac{\sqrt{6k}}{\sqrt{\sqrt{(k^2+1)^2+12k^2} - (k^2+1)}}. \quad (3.7)$$

При $k = 1$, значения d равно d_1 и равно корню из трех, когда k стремится к бесконечности значения d равны d_1 и стремятся к бесконечности.

4. Шар или точечная масса:

$$x_0 = \sqrt{2} \cdot h; x_{\min} = 2h; x_m = \frac{h}{2}.$$

Значения функций

$$d = \sqrt{2} ; d_1 = 2\sqrt{2} , \quad (3.8)$$

т.е. определяются постоянными числами.

Закономерности изменения функций d и d_1 для рассмотренных выше тел двумерного случая иллюстрированы на рис. 3.2 и 3.3. На них прямая 1 соответствует бесконечной горизонтальной материальной линии, кривые 2 и 3 отражают характер изменения функций d и d_1 соответственно для бесконечных материальных вертикальной и горизонтальной полос.

Из рисунков видно, что обе функции начинаются с одного и того же значения, равного корню из трех. Далее с увеличением параметров m и k кривая 2 возрастает, кривая 3 убывает (на бесконечности до единицы). Степень изменения функции d_1 выше, чем функции d , поэтому легче пользоваться значениями d_1 (примерно до $m = 3$).

Заслуживающим внимания фактором является то, что на обоих рисунках кривая 2 расположена выше линии 1, кривая 3 – ниже.

Этот факт позволяет сразу определить форму тела. В случае, если получаемые из практических определений значения d и d_1 равны корню из трех это горизонтальная линия, больше корня из трех это вертикальная полоса или меньше корня из трех горизонтальная полоса. По тому, каким точкам графиков 2 или 3 соответствуют полученные значения можно по горизонтальной оси определить значения параметров k или m .

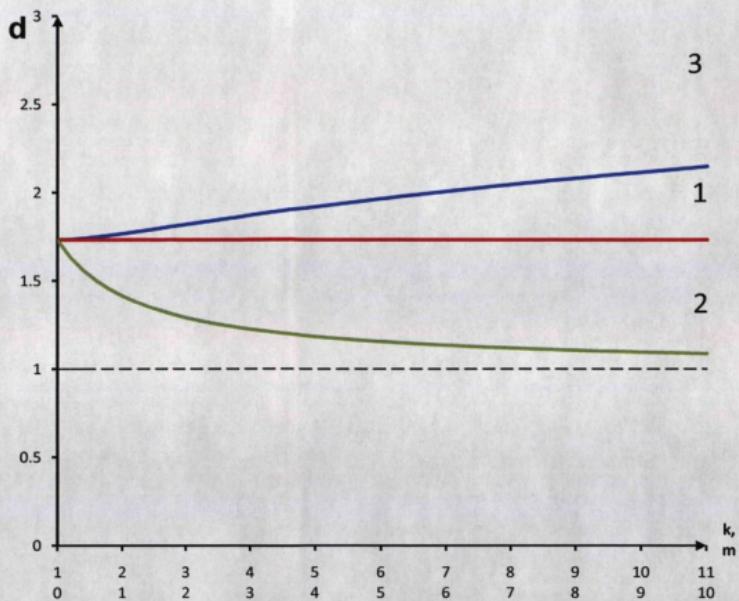


Рис 3.2

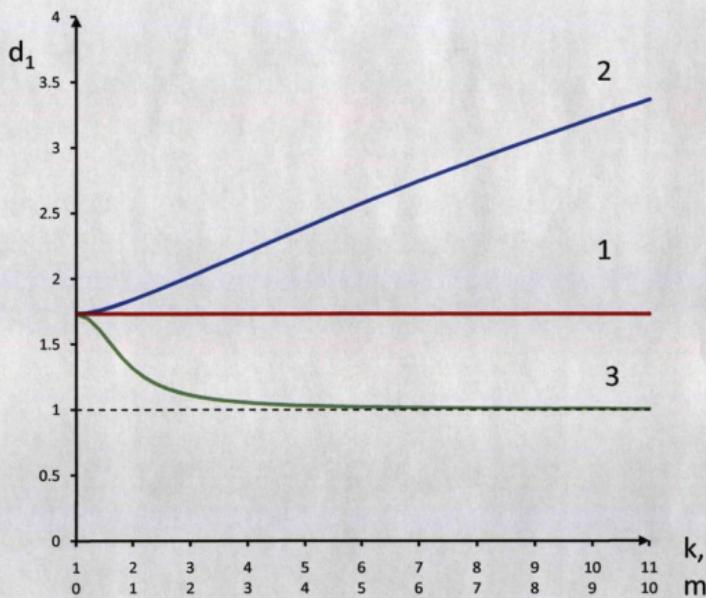


Рис 3.3

3.1.2. Применение интегральных значений аномалий V_{xz} и V_{zz} .

Функции d и d_1 найдены по значениям горизонтальных координат характерных точек производных v_{xz} и v_{zz} . Эти значения в неблагоприятных случаях могут зависеть от случайных помех. Поэтому ниже дается помехоустойчивый интегральный способ определения формы и параметров источников полей, основанный на сравнении площадей под кривыми графиков производных и осью x .

Способ основан на применении функции

$$d_2 = \frac{\int_0^\infty |V_{xz}(x)| dx}{\int_0^{x_0} V_{zz}(x) dx} . \quad (3.9)$$

Аналитические выражения этой функции для аномалий от бесконечной горизонтальной линии, бесконечных материальных горизонтальной и вертикальной полос приведены ниже – соответственно формулы (3.10), (3.11) и (3.12):

$$d_2 = 2 , \quad (3.10)$$

$$d_2 = \frac{4 \cdot \operatorname{arctg}(m)}{\ln \frac{(\sqrt{m^2+1}+m)^2+1}{(\sqrt{m^2+1}-m)^2+1}} , \quad (3.11)$$

$$d_2 = \frac{\ln k}{\operatorname{arctg} \sqrt{k} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{k}}} \quad (3.12)$$

Графики изменения этих функций показаны на рис. 3.4. Условные обозначения здесь такие же, как и на рис. 3.2 и 3.3. Кривые начинаются с значения $d_2 = 2$, соответствующего также бесконечной горизонтальной материальной линии. На бесконечности значения d_2 стремятся к бесконечности для случая бесконечной вертикальной материальной полосы и к нулю для горизонтальной полосы.

Поведение кривых по виду подобно поведению кривых, изображенных на предыдущих рисунках. Аналогично определятся форма тела, затем значения параметров m и k .

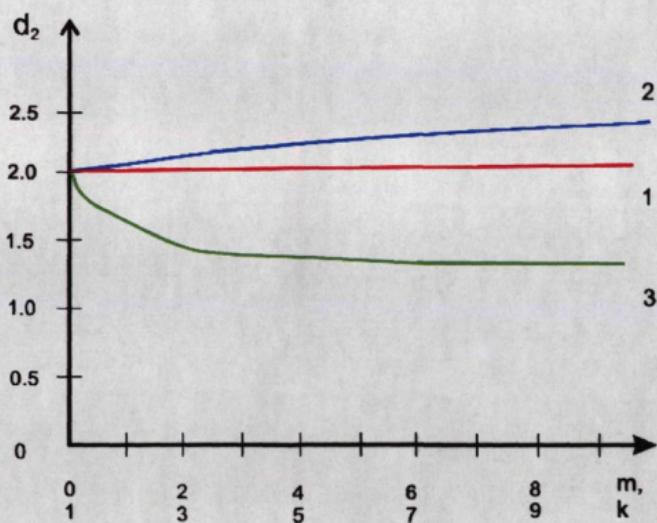


Рис 3.4

3.2. Совместная интерпретация вертикального градиента поля со значениями исходного гравитационного поля, его вертикальной производной второго порядка и спектров аномалий.

Некоторые вопросы применения значений вертикального градиента гравитационного поля были рассмотрены в предыдущих разделах работы. Здесь же рассмотрим несколько способов, разработанных специально для определения формы и параметров тел по совместному анализу спектров Фурье вертикального градиента V_{zz} и значений аномалий исходного поля V_z и его производных V_{zz} и V_{zzz} [36, 38]. Непосредственно используемыми значениями этих функций являются горизонтальная координата максимального значения спектра вертикальной производной поля ω_m в двухмерном случае и r_m – в трехмерном и максимальные значения указанных выше аномалий $(V_z)_m$ $(V_{zz})_m$ и $(V_{zzz})_m$, а также горизонтальные координаты точек перехода через нуль функции V_{zz} – значение $|x_0|$, точек минимумов этой же функции $|x_{min}|$ и точек экстремумов горизонтальной производной v_{xz} – значение $|x_e|$. В дальнейшем знаки модуля в значениях горизонтальных координат будут опущены.

Первый способ.

Предлагаемый способ определения формы тела, глубины его залегания, горизонтальных и вертикальных размеров, а также массы тела основан на применении функций:

$$\alpha = \frac{V_{zz}(m)}{\omega_m^2} , \quad (3.13)$$

в трехмерном случае

$$\alpha_1 = \frac{V_{zz}(m)}{\rho_m^3} . \quad (3.14)$$

Значения этой функции для некоторых из наиболее применяемых на практике источников гравитационного поля правильной формы приведены ниже. Выражения для $(V_{zz})_m$ и ω_m даны в формулах раздела 1.3.

1. Бесконечная горизонтальная материальная линия

$$\alpha = 2G\lambda, \alpha_h = 1,$$

где G – гравитационная постоянная, λ - линейная плотность, α_h – нормированная к единице в начале координат значение α :

$$\alpha_h = \frac{\alpha}{\alpha_0}. \quad (3.15)$$

В данном случае функция α является постоянной величиной и зависит только от массы тела.

2. Бесконечная горизонтальная материальная полоса.

$$\alpha = \frac{4G\mu l \frac{m^2}{m^2 + 1}}{\operatorname{arctg}^2 m};$$

$$\alpha_h = \frac{\frac{m^2}{(m^2 + 1)}}{\operatorname{arctg}^2 m}. \quad (3.16)$$

где $m = l/h$, h – глубина залегания, μ - поверхностная плотность, l – половина ширины полосы.

При $m = 0$ функция α равна $4G\mu l$, $\alpha_h = 1$. Когда m стремится к бесконечности, значение α стремится к $16G\mu l/\pi^2$, $\alpha_h = 4/\pi^2 = 0,40$

3. Бесконечная вертикальная материальная полоса.

$$\alpha = 2G\mu \Delta h \frac{(k-1)^2}{k \ln^2 k};$$

$$\alpha_H = \frac{(k-1)^2}{k \ln^2 k}.$$
(3.17)

где - $\Delta h = h_2 - h_1$, $k = h_2/h_1$, h_1 и h_2 глубины залегания верхней и нижней границ полосы.

При $k \rightarrow 1$ функция α равна $2G\mu \Delta h$, а $\alpha_H = 1$.
Когда $k \rightarrow \infty$ значение α также стремится к бесконечности.

4. Шар или точечная масса.

$$\alpha = 2GM;$$

$$\alpha_H = 1,$$
(3.18)

где M – масса тела, и в данном случае функция α_1 является постоянной и зависит только от массы.

5. Вертикальная материальная линия.

$$\alpha = G\lambda \Delta h \frac{(k-1)^2 - \left(1 - \frac{1}{k}\right)^2}{\ln^3 k};$$

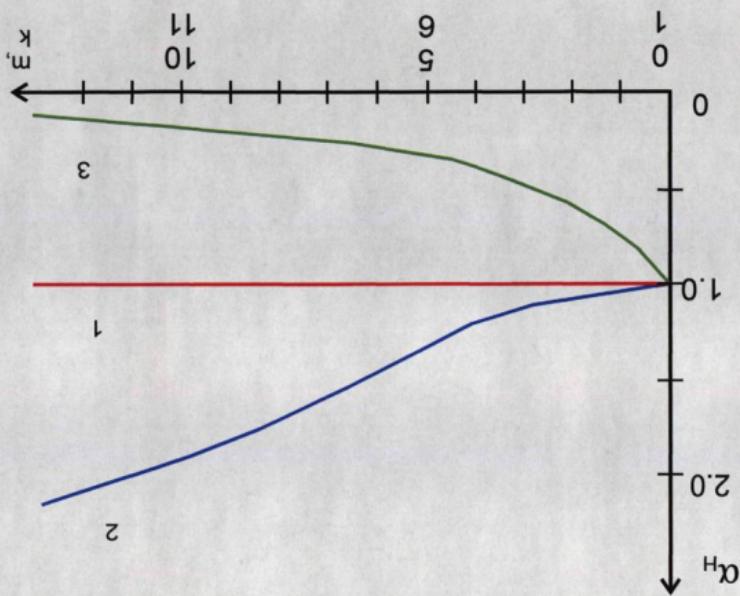
$$\alpha_H = \frac{(k-1)^2 - \left(1 - \frac{1}{k}\right)^2}{2 \ln^3 k},$$
(3.19)

где $\Delta h = h_2 - h_1$.

При $k \rightarrow 1$ эта функция стремится к значению $2G\lambda\Delta h$, а α_n к единице; при $k \rightarrow \infty$ значение $\alpha_1 \rightarrow \infty$.

Закономерности изменения функции α_n для первых трех из рассматриваемых тел показаны на рисунке 3.5. На рисунок нанесены нормированные к единице значения α_n . Кривая 1 соответствует бесконечной горизонтальной линии. Кривые 2 и 3 относятся соответственно к бесконечным материальным вертикальной и горизонтальной полосам. Из рисунка видно, что кривая 2 почти монотонно возрастает. Кривая 3 резко меняется при изменении k от 1 до 5, а дальше монотонно и очень слабо уменьшается. Примечательно то, что кривые, принадлежащие разным телам, находятся в разных сторонах от линии 1 и расположены на плоскости рисунка в непересекающихся друг от друга областях.

Pnc. 3.5



Использование полученных выражений можно осуществить в двух вариантах.

Первый вариант. Значения функций α и α_1 зависят от массы тел. Это обстоятельство затрудняет прямо пользоваться графиками рис. 3.5., которые соответствуют нормированным к единице, не зависящим от массы значениям α_n . Чтобы получить такие значения, можно поступить следующим образом.

От влияния массы можно освободиться, пользуясь спектром аномалии V_z , а именно, его значением в начале координат $S(0)_{V_z}$. Если вычислили только спектр аномалии V_{zz} , то можно воспользоваться равенством, которое легко получается из теоремы о спектрах

$$S(0)_{V_z} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{S(\omega)_{V_{zz}}}{|\omega|} .$$

Значение $\alpha(0)$ можно определить из выражения

$$\alpha(0) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} S(0)_{V_z} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} V_z(x) dx = 2G\lambda , \quad (3.20)$$

т.е. $\alpha(0)$ равно значению α для случая аномалий от бесконечной горизонтальной материальной линии.

Тогда нормированные значения функции α можно определить из равенства

$$\alpha_H = \frac{\alpha}{\alpha(0)} = \frac{\alpha}{2G\lambda} = \frac{\sqrt{2\pi}}{2} \frac{\alpha}{S(0)_{V_z}} = \frac{V_{zz}(m)}{\omega_m^2 S(0)_{V_z}} . \quad (3.21)$$

Методика применения предлагаемого способа заключается в следующем. Если отсутствуют измеренные значения вертикального градиента, то по полю V_z вычисляют спектр $S(\omega)_{V_z}$ и значения вертикального градиента V_{zz} .

Спектр аномалии вертикального градиента находят по формуле

$$S(\omega)_{V_{zz}} = |\omega| \cdot S(\omega)_{V_z} . \quad (3.22)$$

Если имеются измеренные значения вертикального градиента, то сразу находят его спектр. На следующем этапе по вычисленным данным определяют значения ω_m и $(V_{zz})_m$. Тогда по формулам (3.13), (3.21) находят нормированные значения a_n , полученное значение сравнивают с данными рис. 3.5.

Форму тела определяют по тому, какой области рисунка соответствует это значение a_n . Если оно больше единицы, то аномалия соответствует вытянутым в вертикальное направление массам, которые можно аппроксимировать вертикальной полосой. Если найденное значение меньше единицы, то источник поля можно аппроксимировать горизонтальной полосой. Если же оно равно единице или близко к ней, то источником поля является горизонтальная материальная линия или горизонтальный круговой цилиндр. Таким образом, форма тела определяется сразу же. По тому, какой точке линий 2 и 3 соответствует полученное значение a_n , определяют величину параметра $k = h_2/h_1$ или $m = l/h$.

Во втором варианте пользуются только функцией a , не нормируя ее значения. Для этого необходимо воспользоваться аналитическим продолжением поля на высоту H или в нижнее полупространство на глубину $-H$. В этом случае функции ω_m и $(V_{zz})_m$ будут зависеть не от h , h_1 и h_2 , как это было выше, а от значений $h \pm H$, $h_1 \pm H$, $h_2 \pm H$. Тогда в полученных выше формулах для a и a_1 , параметрами будут значения

$$m = \frac{1}{(h \pm H)}, \quad k = \frac{(h_2 \pm H)}{(h_1 \pm H)} . \quad (3.23)$$

Отсюда и следует методика применения выражений (3.15) – (3.19), которая сводится к следующему:

- определяют спектр аномалии V_{zz} ;
- значения полученного спектра умножают на функцию $\exp(-|\omega|H)$ или $\exp(+|\omega|H)$ при $H < h$ или $H < h_1$;
- по найденным спектрам обратным преобразованием Фурье находят значения двух функций V_{zz} (при $H = 0$ и при некотором другом значении H ; если $H > 0$, то можно пользоваться интегралом Пуассона для аналитического продолжения поля в верхнее полупространство);
- определяют по два значения функций ω_m и $(V_{zz})_m$, а по ним и два значения функции α ;
- если из этих двух значений α при увеличении параметра m или k (он будет больше, если, как видно из равенств (3.23), величина H берется с минусом) второе значение больше первого, то источником поля будет вертикальная полоса (рис. 3.5), если же меньше, то – горизонтальная полоса; в случае равенства полученных значений α , имеет место бесконечная горизонтальная материальная линия или круговой цилиндр.

Из изложенного материала видно, что используемая в работе функция α или α_m сильно зависит от формы тела. При этом кривые, соответствующие разным телам расположены на плоскости рисунка в разных непересекающихся друг с другом областях – выше линии 1 или ниже. Это позволяют по форме кривых сразу же определить форму тела. Зная форму тела, легко определяются и его параметры m и k . По ним определяются и значения горизонтальных и вертикальных размеров тел и их глубину залегания.

Второй способ.

Второй способ основан на использовании функции

$$A_1 = \frac{(V_{zz})_m}{(V_z)_m \omega_m}. \quad (3.24)$$

Анализ закономерностей изменения этой функции и сравнение полученных выражений A_1 для рассмотренных выше источников гравитационного поля с выражениями α_H , приведенных выше для тех же

модельных тел (выражения (3.15) – (3.17)) показали, что функции A_1 и α_n полностью идентичны друг другу, т.е.

$$A_1 = \alpha_n = \frac{(V_{zz})_m}{(V_z)_m \cdot \omega_m} = \frac{(V_{zz})_m}{\omega_m^2 \cdot \alpha(0)}. \quad (3.25)$$

Поэтому все выражения, полученные выше для α_n , будут такими же и для A_1 . При этом необходимо отметить следующее. Значениями α_n можно пользоваться на практике с учетом рекомендаций, приведенных выше в вариантах 1 и 2. Тем не менее при расчетах возникает необходимость в выполнении лишней операции вычисления спектра аномалий вертикального градиента. При спектральном анализе полей эта операция является необходимой и не лишней. Это же касается и значений функции A_1 .

В отличии от функции α_n выражение A , определяется через известные значения аномалий вертикального градиента и исходного гравитационного поля и горизонтальной координаты максимального значения спектра функции V_{zz} .

Третий способ.

Этот способ основан на применении функции

$$A_2 = \frac{(V_{zz})_m}{(V_z)_m} \cdot x_0. \quad (3.26)$$

И в данном случае анализ получаемых выражений и их сравнение с формулами (3.15) – (3.17) для рассматриваемых модельных тел показывает, что

$$A_1 = A_2^2 = \alpha_n; A_2 = \sqrt{A_1}. \quad (3.27)$$

Пользуясь этими соотношениями значения A_2 можно определить через известные значения A_1 или d_n и наоборот. Преимуществом функции A_2 является то, что ее значения полностью определяются через известные

значения функций $V_z(0)$, $V_{zz}(0)$ и x_0 , не прибегая к вычислению спектра вертикального градиента поля.

Четвертый способ.

В этом способе используемой функцией является

$$A_3 = \frac{(V_{zzz})_m}{(V_{zz})_m} \cdot x_0 . \quad (3.28)$$

Отсюда видно, что для определения этой функции необходимо определить максимальные значения вертикальных производных гравитационного поля первого и второго порядков и определить величину X_0 по графику функции $V_{zz}(x)$. И в данном случае вычисления производятся по значениям самих аномалий, не прибегая к методам спектрального анализа. При этом интерпретация аномалий производится по совместному анализу значений вертикальных производных поля первого и второго порядков. Полученные выражения, определяющие значения функции A_3 для рассмотренных выше модельных тел, приведены ниже.

1. Бесконечная горизонтальная материальная линия (круговой цилиндр)

$$A_3 = 2,0 . \quad (3.29)$$

2. Бесконечная горизонтальная материальная полоса.

$$A_3 = \frac{2}{\sqrt{m^2 + 1}} . \quad (3.30)$$

При $m = 0$ значение $A_3 = 2$. На бесконечности $A_3 = 0$.

3. Бесконечная вертикальная материальная полоса.

$$A_3 = \frac{k+1}{\sqrt{k}}. \quad (3.31)$$

При $k = 1$ эта функция также равна нулю. При $k \rightarrow \infty$ значение $A_3 \rightarrow \infty$.

4. Шар или точечная масса.

$$A_3 = 4,24. \quad (3.34)$$

Графики изменения полученных выражений функций A_2 и A_3 для рассматриваемых двухмерных тел показаны на рисунках 3.6 и 3.7. Они имеют такой же вид, что и графики приведенного выше рис. 3.5. На рисунках 3.6 и 3.7 кривые 2 соответствуют аномалиям от бесконечной вертикальной материальной полосы, и построены они в зависимости от изменения значений параметра $k = h_2/h_1$.

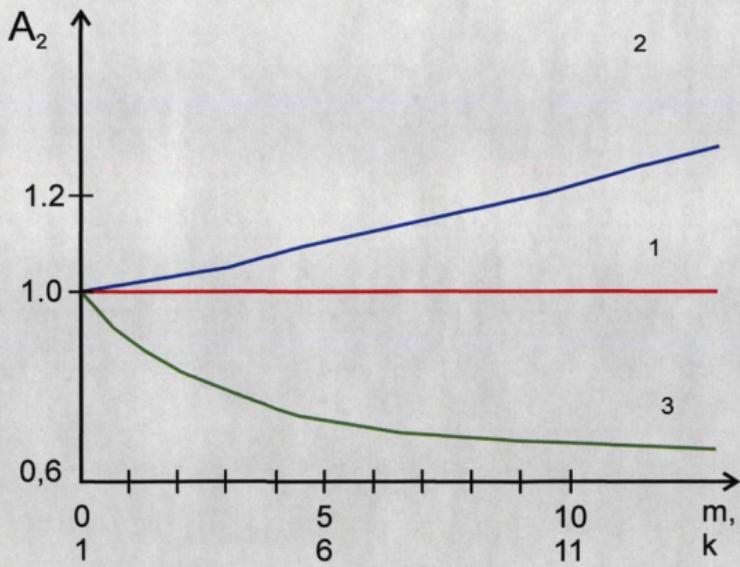


Рис 3.6

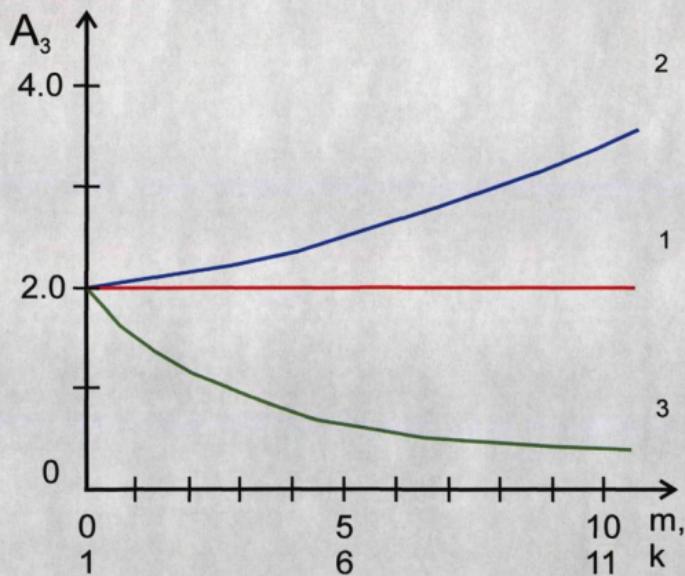


Рис 3.7

Кривые 3 относятся к случаю аномалий от бесконечной горизонтальной материальной полосы и построены они в зависимости от изменения значений параметра $m = l/h$. Кривая 2 на рис. 3.6 является возрастающей, а кривая 3 – убывающей. Начинаются они с одного и того же значения $A_2 = 1,0$, которое соответствует также аномалии от бесконечной горизонтальной материальной линии. При $k \rightarrow \infty$ значение $A_2 \rightarrow \infty$, а при $m \rightarrow \infty$ значение $A_2 = 0,63$.

На рисунке точки, соответствующие функции A_2 для случаев бесконечных материальных вертикальной и горизонтальной полос, находятся в разных непересекающихся друг и другом областях – выше и ниже линии $A_2 = 1,0$. Это свойство функции A_2 и позволяет легко и уверенно определить форму тела двухмерной аномалии: если найденное по измененным значениям аномалии значение $A_2 = 1,0$, то аномалия соответствует бесконечной горизонтальной материальной линии, если $A_2 > 1$, то – бесконечной материальной вертикальной полосе, если же $A_2 < 1$, то – бесконечной материальной горизонтальной полосе. А по горизонтальной координате точек кривых 2 или 3, с которой совпало найденное из практических данных значение A_2 можно определить величину параметра

$$k = h_2/h_1 \text{ или } m = l/h$$

Таким же путем можно применить и кривые 2 и 3 рисунка 3.7. При этом общее значение кривых 2 и 3, с которого они начинаются, для случая функции A_3 равно 2,0.

Это же значение A_3 соответствует также и аномалиям от бесконечной горизонтальной материальной линии.

При $k \rightarrow \infty$ значение $A_3 \rightarrow \infty$. При $m \rightarrow \infty$ значение $A_3 = 0$. Следует отметить, что по кривой 2 рисунка 3.6 трудно определить значение параметра k при малых его значениях ($k \leq 3$) (из-за того, что ее изменения достаточно малы). Легко определяются значения параметра m при изменении m от нуля до 5 (кривая 3, рис. 3.6). При $m > 5$ кривая 3 меняется очень медленно, что

также создает трудности при определении т. Но в любом случае форма источников поля всегда определяется легко – по тому признаку выше ли линии 1 находится найденная из практических данных значение функций $A_1 = \alpha_n$, A_2 и A_3 или ниже.

Таким образом, по предложенным способам в первую очередь можно определить форму тела, после класс источников поля – точечные источники (горизонтальные линии), горизонтально ли вытянутые тела или вертикально вытянутые. В первом приближении этим тела можно аппроксимировать бесконечными материальными полосами – горизонтальной или вертикальной. В дальнейшем, зная класс источников поля, можно определить более точную их форму, но уже среди горизонтальных или вертикальных пластов.

На результатах исследований данной главы основаны второе и третье защищаемые положения работы.

Глава 4. Результаты практического применения разработанных способов интерпретации аномалий гравитационного поля

В данной главе дано описание предлагаемых способов вычисления первой вертикальной производной гравитационного поля, показаны основные преимущества разработанных в данной работе способов перед существующими. Способы опробованы на практических материалах гравитационного поля одного из перспективных на наличие нефти и газа участков Тюменской области.

Приведены результаты опробования разработанных способов интерпретации аномалий гравитационного поля с использованием значений его вертикального градиента на пяти реальных аномалиях двух региональных профилей, проходящих в условиях разного геологического строения в северо-западной части Египта и в юго-восточной части Казахстана.

4.1 Практические схемы вычисления вертикальной производной гравитационного поля

Известно, что значение вертикальных производных гравитационного поля первого порядка труднее вычислять (см. раздел 1.3.), чем второго. Поэтому на практике в основном определяют вертикальные производные второго порядка. Тем не менее формулы для определения значений вертикальной производной первого порядка существуют (способы [1, 15, 43] А.К.Маловичко, К.Е. Веселова, К.Ф.Тяпкина). Все они являются многочленными и поэтому громоздкими и малопригодными на практике. В настоящем разделе рассмотрим более удобные и более пригодные для практических расчетов вычислительные схемы. Такие вычислительные схемы получены и приведены в работах [48, 51], но к практическим вычислениям они не были приспособлены и мало применялись.

Эти вычислительные схемы следующие. В трехмерном случае

$$V_{zz}(0) = \frac{1}{S} [2,47 V_z(0) - 2\overline{V_z(s)} - 0,25\overline{V_z(3s)} - \\ - 0,12\overline{V_z(5s)} - 0,10\overline{V_z(7s)}] , \quad (4.1)$$

где S - расстояние между пунктами наблюдений, $\overline{V_z(r_i)}$ - осредненное значение поля на окружности радиуса r_i при $r_i = s, 3s, 5s$ и $7s$ (всего четыре окружности).

В двухмерном случае

$$V_{zz}(0) = \frac{1}{\Delta x} [1,57 V_z(0) - 1,29\overline{V_z(\Delta x)} - 0,16\overline{V_z(3\Delta x)} - \\ - 0,06\overline{V_z(5\Delta x)} - 0,06\overline{V_z(7\Delta x)}] , \quad (4.2)$$

где Δx – расстояние между пунктами наблюдений, $\overline{V_z(x_i)}$ - осредненное значение поля по двум точкам профиля, равноотстоящим от начала координат на расстояние x_i при $x_i = \Delta x, 3\Delta x, 5\Delta x, 7\Delta x$ (всего четыре радиуса осреднения).

Выражения (4.1) и (4.2) можно заменить на несколько приближенные, но более облегченные для практических вычислений формулы:

$$V_{zz}(0) = \frac{1}{S} [2,5V_z(0) - 2\overline{V_z(s)} - 0,50\overline{V_z(3s)}] , \quad (4.3)$$

$$V_{zz}(0) = \frac{1}{\Delta x} [1,60 V_z(0) - 1,30\overline{V_z(\Delta x)} - 0,30\overline{V_z(3\Delta x)}] . \quad (4.4)$$

Предельное значение погрешности применения формулы (4.2) можно определить по выражению [48]

$$\gamma = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2C_0^2 + \sum_{i=1}^n C_i^2} \right] \frac{\epsilon}{\Delta x} , \quad (4.5)$$

где ϵ – погрешность определения аномалии силы тяжести, C_i – коэффициент вычислительной схемы. Получим:

$$\gamma = 1,82 \frac{\epsilon}{\Delta x}.$$

В трехмерном случае для выражения (4.1) погрешность можно определить по формуле [48]

$$\gamma = \frac{\epsilon}{2S} \sqrt{4C_0^2 + \sum_{i=1}^n C_i^2} = 2.67 \frac{\epsilon}{S}.$$

Формулы (4.1) и (4.2) получены разложением частотной характеристики операции вычисления вертикального градиента поля в ряды бесселевых функций и в ряды косинусов [48, 51]. Полученные ряды бесконечные, но очень быстро сходящиеся, что также видно из величины коэффициентов указанных формул. Это обстоятельство и позволило ограничиться в них пятью членами, а в облегченном вариантах (4.3) и (4.4) – тремя членами. Формулы (4.3) и (4.4) практически дают такие же результаты, как и вычислительные схемы (4.1) и (4.2). Поэтому на практике всегда можно пользоваться выражениями (4.3) и (4.4).

Формулы (4.3) и (4.4) являются более простыми и удобными для практических вычислений, чем все известные на практике вычислительные схемы. В них осредненные значения поля берутся всего при двух радиусах, на двух окружностях осреднения, тогда как в наиболее удобной из известных на практике вычислительных схем в способе А.К.Маловичко осредненные значения поля нужно брать на шести окружностях.

4.2 Результаты практического опробования вычислительных схем.

Рассмотренные формулы опробованы на практических материалах гравиметрической съемки на одной из площадей в Тюменской области.

Карта исходного гравитационного поля в условном уровне показана на рис. 4.1. Карта построена по профилям, заданным неравномерно по площади. Поэтому значения вертикального градиента определялись по формуле (4.2) в двухмерном варианте. По найденным значениям в точках профилей построена карта изменения вертикального градиента по площади. Она иллюстрирована на рис. 4.2. Результаты вычисления по более простой формуле (4.4) практически не отличаются от тех, что показаны на схеме 4.2.

Как известно, в значениях гравитационного поля отражено влияние всех источников поля, но обнаружить их на карте исходного наблюдаемого поля не всегда легко. С этой целью и применяют различные преобразования полей, в частности, вычисления значений высших производных. В рассматриваемом случае на карте исходных аномалий четко выделяются влияния нескольких известных крупных структур, тогда как на карте значений вертикального градиента четкими замкнутыми изолиниями выделяются влияния всех известных в районе исследований по сейсмическим данным (1990 г.) структур и, кроме того, выделяются несколько новых неизвестных ранее зон, аномалии в которых могут быть связаны со структурами, не отмеченными ни на одной из опубликованных тектонических карт.

Карта аномалий гравитационного поля в редукции Буге

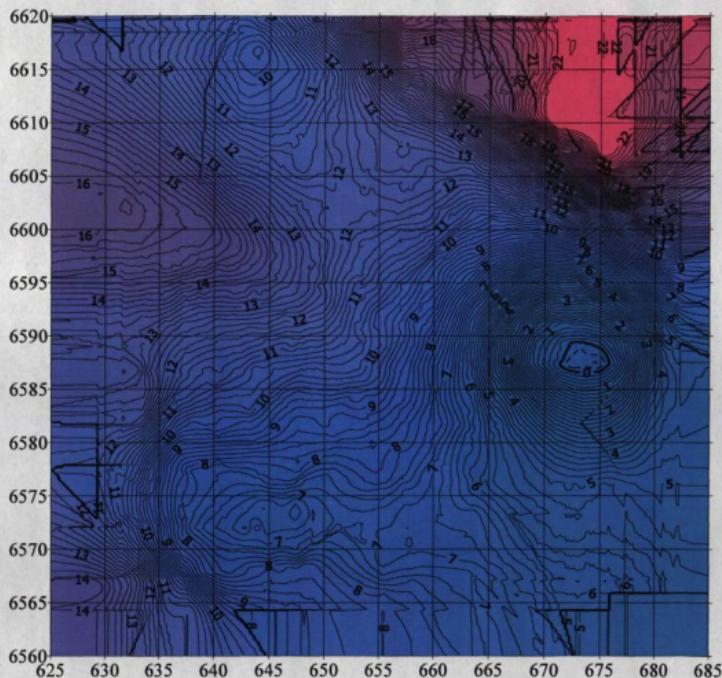


рис. 4.1

Карта аномалий первой вертикальной производной гравитационного поля

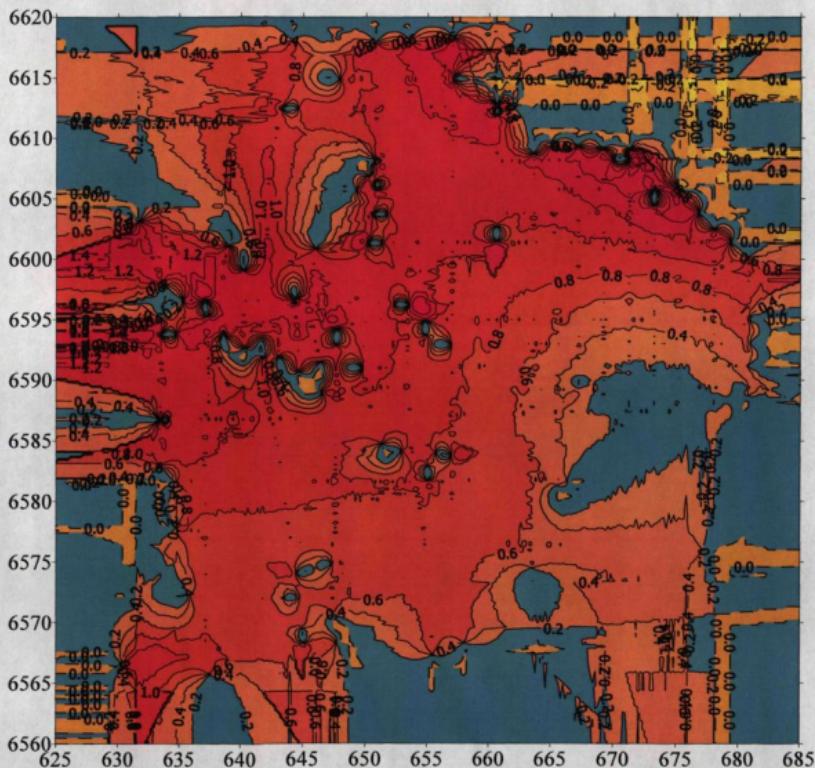


рис. 4.2

Карта аномалий второй вертикальной производной

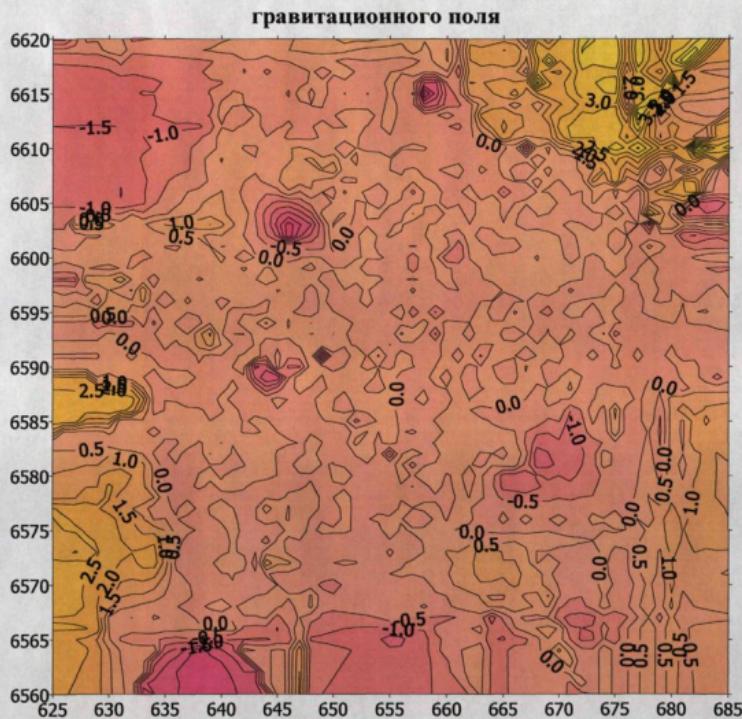


рис. 4.3.

На рис. 4.3. показана карта аномалий наиболее часто применяемой на практике вертикальной производной второго порядка, построенная с использованием формулы М.У.Сагитова. На этой карте также выделяются все аномалии, имеющиеся на схеме 4.2, но карта 4.3 является более сложной, более изрезанной и потому трудно читаемой. Происходит это из-за того, что на ней имеются и ложные аномалии, связанные с формой кривых вертикальных производных второго порядка (кривые производных второго порядка по своей форме сложнее кривых производных первого порядка). Кроме того, чем выше порядок производной, тем выше и погрешность вычислений. Отсюда вывод: при выделении локальных аномалий потенциальных полей предпочтение нужно отдать способам вычисления вертикальной производной первого порядка. До сих пор больше всего на практике вычислялись значения вертикальных производных второго порядка. Это происходило из-за того, что не были известны удобные вычислительные схемы для определения значений производных первого порядка. Такие вычислительные схемы и предлагаются для применения на практике в данной работе. В их преимуществах не приходится сомневаться. Значения вторых вертикальных производных нужно также применять на практике, но только для решения более тонких задач, например, для разделения влияний двух и более источников поля, близко расположенных друг к другу по горизонтали.

Таким образом, в данном разделе работы подчеркнуто очевидное положение о том, что на первом этапе применения вертикальных производных нужно вычислять производные первого порядка, на втором этапе, если есть на это необходимость, нужно применять значения производных второго порядка.

Предложены удобные для этого вычислительные схемы, позволяющие определить на практике значения вертикального градиента с такой же легкостью, с какой вычислялись до сих пор вертикальные

производные второго порядка. Предлагаемые вычислительные схемы опробованы на практических материалах гравитационного поля в одном из перспективных на нефть и газ районах центральной части Западной Сибири (Уватский район Тюменской области). В результате такого опробования получены несколько новых аномалий, которые по своему месторасположению связаны со структурами осадочного чехла, перспективными на наличие скоплений нефти и газа.

4.3. Результаты опробования разработанных способов определения формы и параметров тел

Основное преимущество способов, разработанных в данной работе, заключается в их чувствительности к форме аномальных источников. Как было показано выше, способы позволяют определить в первую очередь форму аномальных тел, а потом и их параметры. Погрешности в интерпретации аномалий, связанные с не учетом формы источников, могут быть значительно больше погрешностей, вызванных случайными ошибками наблюдений.

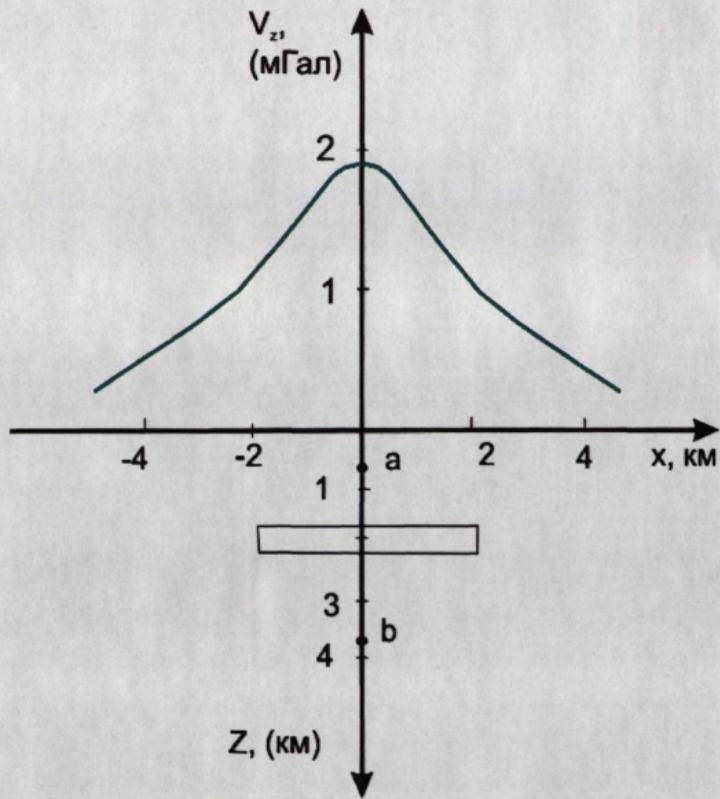


Рис 4.4

Для иллюстрации этого положения рассмотрим ниже рис. 4.4. Он соответствует аномалии силы притяжения от бесконечной горизонтальной материальной полосы шириной $2l = 4$ км, залегающей на глубине $h = 2$ км. Если определить по этой аномалии глубину залегания с использованием формул других двухмерных тел, то получим значения, расположенные на рисунке между точками **a** и **b**. Из рисунка видно, что колебания в значениях h довольно большие и они могут быть еще больше для тел, имеющих форму нефтегазоносных структур. В общем случае этот факт следует из неоднозначности решения обратной задачи. Знание формы тела значительно уменьшает эту неоднозначность.

Приведем ниже результаты опробования разработанных способов анализа и интерпретации аномалий.

На рис. 4.5. показаны значения гравитационного поля вдоль одного из профилей в северо-западной части Египта, входящей в пределы северной части Западной Пустыни. Профиль проходит от севера в юго-восточном направлении через впадину Катара.

Границы 1, 2 и 3 на этом рисунке построены нами по результатам спектрального анализа. Они соответствуют современным представлениям о глубинном строении данной территории. Граница 1 - гравиактивная граница (плотностной контакт) в толще осадочных пород (юрские отложения) подтверждены также сейсморазведочными данными. Граница 3 соответствует нижней границе земной коры – границе Мохоровичича. Она слабо погружается в юго-восточном направлении. Граница 2 также погружается в этом направлении, ее можно отнести к границе Конрада.

Увеличению значений глубины залегания границы Мохоровичича соответствует общее уменьшение в указанном направлении и значений регионального гравитационного поля. Это отчетливо видно из рисунка 4.5. Гравитационное поле границы Мохоровичича, восстановленное с

использованием значений ее глубины залегания показано на рисунке пунктирной линией. Как видно из рисунка, эта кривая достаточно хорошо осредняет значения наблюденного гравитационного поля.

На суммарной аномалии рис. 4.5 четко выделяются две положительные локальные аномалии, достаточно больших размеров. На рисунке они обозначены соответственно цифрами 1 и 2. Аномалия 1 по своему месторасположению соответствует восточной части территории, а аномалия 2 – зоне южнее точки 3. Они не находят своего отражения в границах h_2 и h_3 , поэтому рассмотрим их более подробно и выясним их геологическую породу.

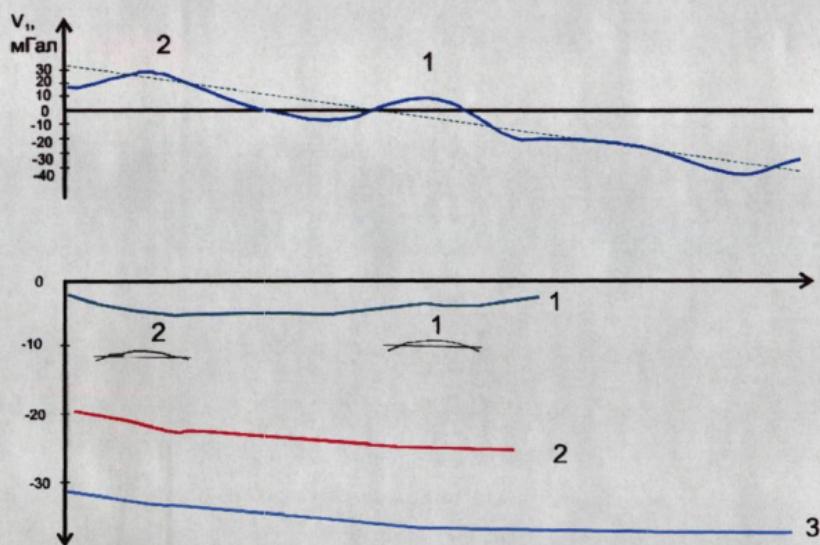


Рис 4.5

Эти аномалии, выделенные в их центральной части, иллюстрированы на рис. 4.6., в общем виде на рис. 4.6 (а). со снятыми значениями линейного фона на рис. 4.6 (б). Найденные по аномалиям значения спектров $S(\omega)$ и произведения $\omega S(\omega)$ соответственно для аномалий 1 и 2 показаны на рис. 4.7

в случаях а и б. Здесь спектр $S(\omega)$ соответствует спектру исходного гравитационного поля V_z , а произведение

$$|\omega| \cdot S(\omega) = \omega \cdot S(\omega) = S(\omega)_{V_{zz}}$$

определяет спектр аномалии вертикального градиента поля [36, 38].

Исходные данные для интерпретации этих аномалий приведены в таблице 4.1 в строках 1 и 2 соответственно для аномалий 1 и 2. Значения V_{zz} найдены по формуле (4.4) при $\Delta x = 2,5$ км. При этом не было необходимости в определении значений вертикального градиента во всех точках профиля, а только при $x = 0$ и выборочно в точках возможного нахождения координат x_0 и x_{min} для их определения. Значения V_{xz} для определения величины координаты x_e были найдены графически. Значения $V_{zzz}(0)$ определялись по формуле М.У.Сагитова

$$V_{zzz}(0) = \frac{4}{S^2} [V_z(0) - \overline{V_z(S)}],$$

при $S = 2,5$ км.

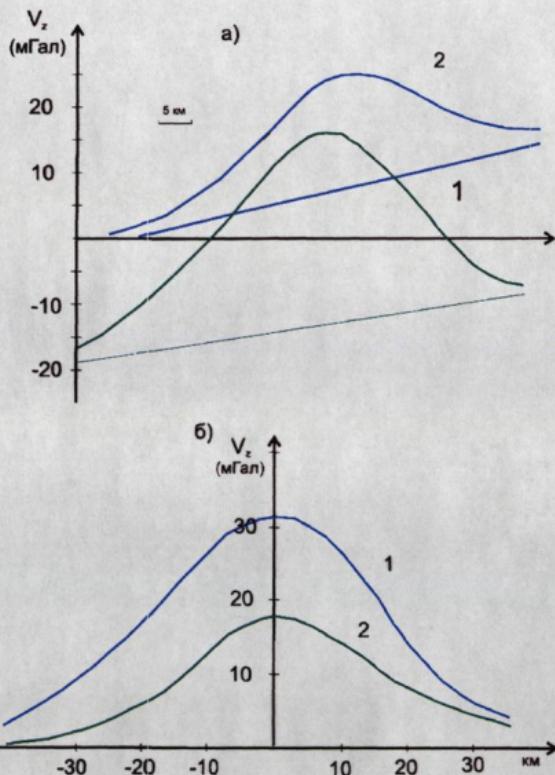


Рис 4.6

Координаты максимального значения спектров $S(\omega)_{V_{zz}}$
определялись по графикам рисунков 4.7.

Найденные по формулам (3.1), (3.2), (3.9) и (3.24) – (3.26), (3.28)
значения d , d_1 , d_2 и A_1, A_2, A_3 приведены в таблице 4.1 также в строках 1 и 2
соответственно для аномалий 1 и 2.

Таблица 4.1

Основные параметры аномалий

№№ п/п	V_z мГал	V_{zz} мГал км	V_{zzz} мГал км ²	X_0 км	X_{min} км	X_e км	ω_m $\frac{1}{\text{км}}$	d	d_1	d_2	A_1	A_2	A_3
1.	32	1,49	0,114	18	26	17,3	0,066	1,44	1,04	1,39	0,70	0,81	1,09
2.	18	0,88	0,069	17	26	14,8	0,068	1,53	1,15	1,75	0,72	0,83	1,34
3.	4	0,054	0,00074	58,2	76,6	55,4	0,023	1,32	1,05	1,44	0,58	0,78	0,80
4.	8,5	0,109	0,0012	59,4	75,3	57,7	0,022	1,27	1,03	1,35	0,57	0,76	0,65

По этим значениям функций $d - d_2$ и $A_1 - A_3$ по графикам рисунков 3.2 – 3.7 найдены соответствующие им значения параметра m , которые приведены в строках 1 и 2 таблицы 4.2. Найденные значения являются значениями параметра m потому, что все числа функций $d - d_2$ и $A_1 - A_3$

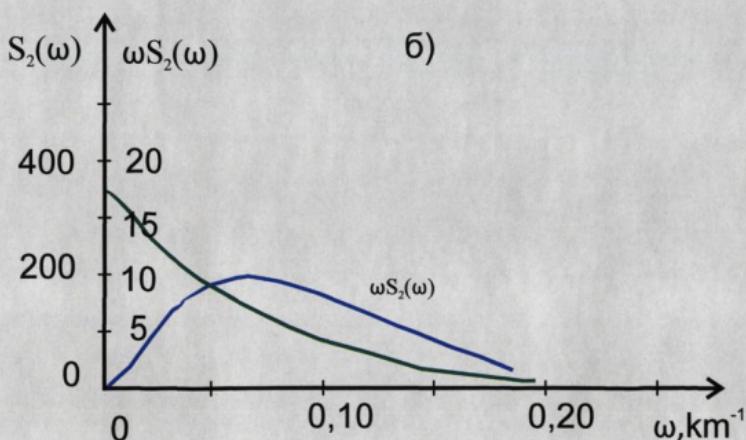
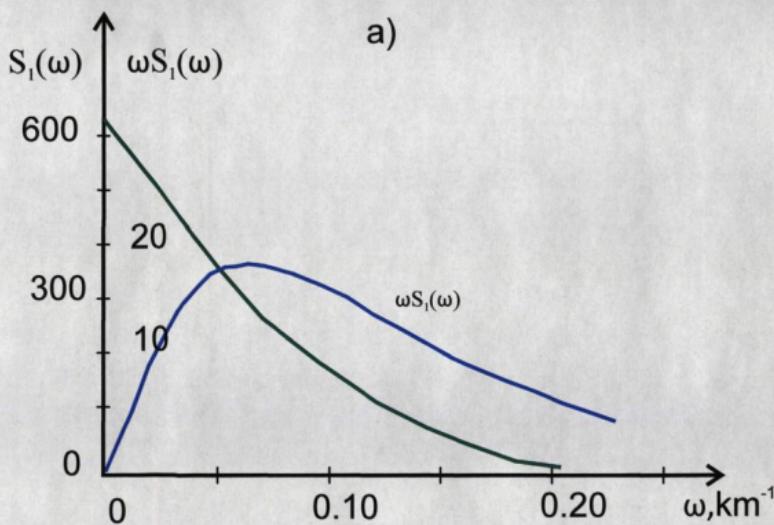


Рис 4.7

Таблица 4.2

Значения m

№№	По значениям						m сред
	п/п	d	d ₁	d ₂	A ₁	A ₂	A ₃
1.	1,55	1,52	1,54	1,50	1,52	1,60	1,54
2.	1,20	1,30	1,10	1,20	1,10	1,15	1,18
3.	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5	2,4	2,50
4.	3,0	3,2	3,1	3,0	3,0	3,1	3,07

лежат на графиках указанных рисунков ниже линии 1, что говорит о том, что источник поля можно аппроксимировать бесконечной горизонтальной материальной полосой. При этом осредненные значения m для аномалий 1 и 2 соответственно равны

$$m_1 = \frac{l_1}{h_1} = 1,54; m_2 = \frac{l_2}{h_2} = 1,18 .$$

Зная m , легко можно определить и значения l и h . Для этого можно использовать аналитические выражения, определяющие аномалию силы тяжести и ее производные для данного вида источника поля. Например, выражение для нахождения координаты точки нуля функции V_{zz}

$$x_0 = \pm \sqrt{l^2 + h^2} = \pm h \sqrt{\frac{l^2}{h^2} + 1} .$$

Отсюда

$$h = \frac{x_0}{\sqrt{\frac{l^2}{h^2} + 1}} . \quad (4.6)$$

По этой формуле для найденных выше значений $m_1 = 1,54$ и $m_2 = 1,18$ найдем соответственно для аномалий 1 и 2 (при $(x_0)_1 = 18$ км. и $(x_0)_2 = 17$ км. – см. табл. 4.1):

$$h_1 = 9,8 \text{ км и } l_1 = 1,54 h_1 = 15,1 \text{ км ;}$$

$$h_2 = 11,0 \text{ км и } l_2 = 13,0 \text{ км}$$

Таким образом, аномалии 1 и 2, иллюстрированные на рисунке 4.3, можно аппроксимировать бесконечной горизонтальной материальной полосой с параметрами, равными соответственно:

$$h = 9,8 \text{ км и } l = 15,1 \text{ км, } h = 11 \text{ км и } l = 13 \text{ км.}$$

Эти значения нанесены и на разрез рис. 4.5. Полученные данные раскрывают геологическую природу аномалий 1 и 2 – они вызваны небольшими пологими, вытянутыми примерно с запада на восток, антиклинальными структурами.

Для достаточно полного опробования разработанных способов интерпретации аномалий, приведенных в предыдущей главе, на практических материалах рассмотрим еще два примера.

Ниже на рисунке 4.8. иллюстрированы значения аномалии силы тяжести вдоль регионального профиля расположенного в пределах так называемого Балхашского сегмента в юго-восточной части Казахстана. Профиль расположен между Чуйским и Жалаир-Найманским глубинными разломами и пересекает зону Конуртобе-Чуйского антиклиниория. Как видно из рисунка, аномалия является единой, мало затухающей в пределах большого расстояния от 200 км до 700 км. Это говорит о том, что источником поля является глубинный, примерно горизонтальный слой или слои, простирающиеся на расстоянии 400-500 км. На суммарном гравитационном поле четко выделяются две локальные аномалии с достаточно большими

амплитудами. Они на рисунке условно обозначения цифрами 1 и 2. Локальные аномалии также имеют значительные размеры – 200-220 км и вызваны более близкими к поверхности источниками, чем источник общей аномалии. На рисунке пунктиром показана осредненная кривая – региональная аномалия, на фоне которой выделяются локальные аномалии.

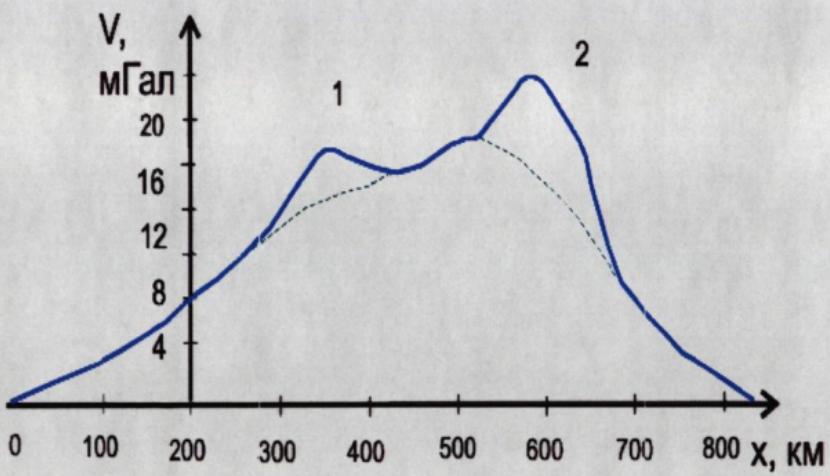


Рис 4.8

Кривые локальных аномалий, выделенные на фоне регионального поля, иллюстрированы на рисунке 4.9.

С использованием полученных выше выражений проведена интерпретация двух локальных аномалий, выделенных на фоне осредненной кривой. Результаты интерпретации следующие. Прежде всего отметим, что интерпретация аномалий проведена полностью по такой же методике, что и выше. Поэтому общие слова, относящиеся к описанию методики применения разработанных способов, здесь опускаем. Приведем лишь результаты интерпретации.

Основные параметры исходных аномалий 1 и 2 (рис. 4.9) приведены также в таблице 4.1 соответственно в строках 3 и 4. Здесь же приведены значения функций $d - d_2$ и $A_1 - A_3$, полученные по данным рисунков 3.2 – 3.7.

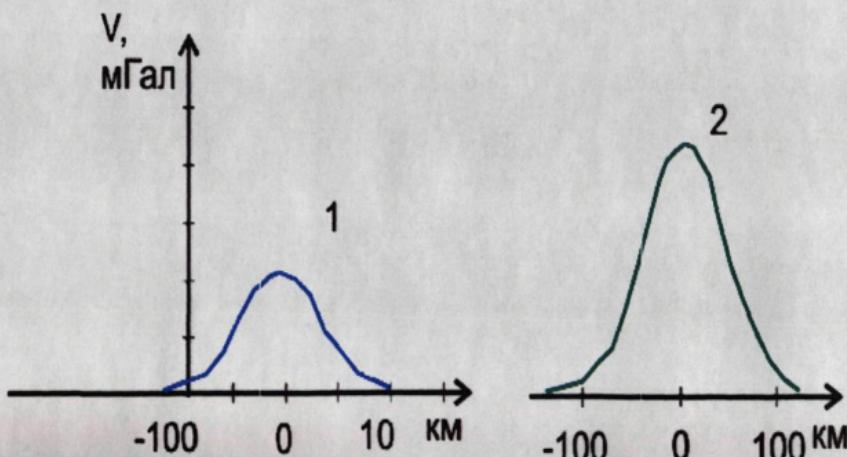


Рис 4.9

Найденные для этих функций значения параметра $m = l/h$ приведены в таблице 4.2 также в строках 3 и 4. Средние значения m для аномалий 1 и 2 равны $m_1 = 2,50$, $m_2 = 3,07$. Найденные по ним из выражения (4.6) величины l и h равны соответственно

$$l_1 = 54 \text{ км}; h_1 = 21,6 \text{ км}; l_2 = 56,5 \text{ км}; h_2 = 18,4 \text{ км}$$

Из этих данных видно, что источник аномалии 2 расположен выше источника аномалии 1 примерно на 3,2 км.

Определим источник общего регионального поля силы тяжести, на фоне которого выделены две рассмотренные выше локальные аномалии (рис. 4.5). Анализ поля по рассмотренной методике с применением функций d и A показал, что в первом приближении источник поля можно аппроксимировать бесконечной горизонтальной материальной полосой шириной $2l = 430$ км, расположенной на глубине $h = 32,4$ км. Для такой полосы максимальное значение аномалии, наблюданной над ее серединой (рис. 4.8)

$$(V_z)_{max} = 4G\mu \cdot \arctg \frac{l}{h} = 19 \text{ мГал} . \quad (4.7)$$

Отсюда

$$G\mu = \frac{(V_z)_{max}}{4 \arctg \frac{l}{h}} = 3.34 \text{ мГал} .$$

Так как

$$\mu = \Delta\sigma \cdot \Delta h ,$$

где $\Delta\sigma$ - избыточная плотность, Δh - мощность пласта, то

$$\Delta h = \frac{\mu}{\Delta\sigma} = \frac{3,34}{G\Delta\sigma} .$$

Здесь в качестве избыточной плотности $\Delta\sigma$ принято наиболее вероятное для данного района значение $0,2 \text{ г/см}^3$.

Более точный анализ поля показал, что источник поля более точно можно аппроксимировать аномалией от бесконечной слабо наклоненной призмы малой мощности. Наклон призмы можно найти, определив разные глубины залегания ее правой и левой краев. При определении глубин в силу большой протяженности пласта в горизонтальном направлении его можно принять за полубесконечную горизонтальную полуплоскость. Максимальное значение горизонтальной производной для полуплоскости наблюдается над ее краем и определяется по формуле

$$(V_{xz})_{max} = \frac{2G\mu}{h}. \quad (4.8)$$

Отсюда

$$h = \frac{2G\mu}{(V_{xz})_{max}}. \quad (4.9)$$

Для максимального значения горизонтальной производной в краевых зонах региональной (осредненной) аномалии силы тяжести получим:

над левым краем

$$(V_{xz})_{max} = 0,18 \text{ мГал/км},$$

над правым краем

$$(V_{xz})_{max} = 0,24 \text{ мГал/км.}$$

Для этих значений производной из равенства (4.9) при найденной выше величине $G\mu = 3,34 \text{ мГал}$ получим значения глубины залегания (соответственно для левого и правого краев) $h = 37,1 \text{ км}$, $h = 27,8 \text{ км}$.

Отсюда можно сделать вывод о том, что левый край пласта расположен глубже правого, т.е. источник пласта можно аппроксимировать наклонным слоем. Эта граница проходит выше границы Мохо, которая проходит здесь ниже 40 км.

Из изложенного материала следует, что по результатам проведенного анализа источник регионального поля можно аппроксимировать слабо наклонной бесконечной призмой с глубинами залегания соответственно правой и левой краев 27,8 км и 37,1 км , в первом приближении бесконечной горизонтальной полосой, расположенной на глубине $h = 32,4$ км. с шириной $2l = 430$ км. Мощность пласта составляет 2,5 км. Эта наблюденная аномалия силы тяжести осложнена двумя локальными аномалиями, интенсивностью 4 мГал и 8,5 мГал, источники которых также можно аппроксимировать бесконечными горизонтальными призмами (в первом приближении также бесконечными горизонтальными полосами), расположенными на глубинах 21,6 км (для левой на рисунке аномалии или аномалии 1) и 18,4 км (для правой аномалии 2). Горизонтальные размеры источников 21 составляют соответственно 108,1 км и 113,2 км. Схематически источники аномалий показаны на рис. 4.10.

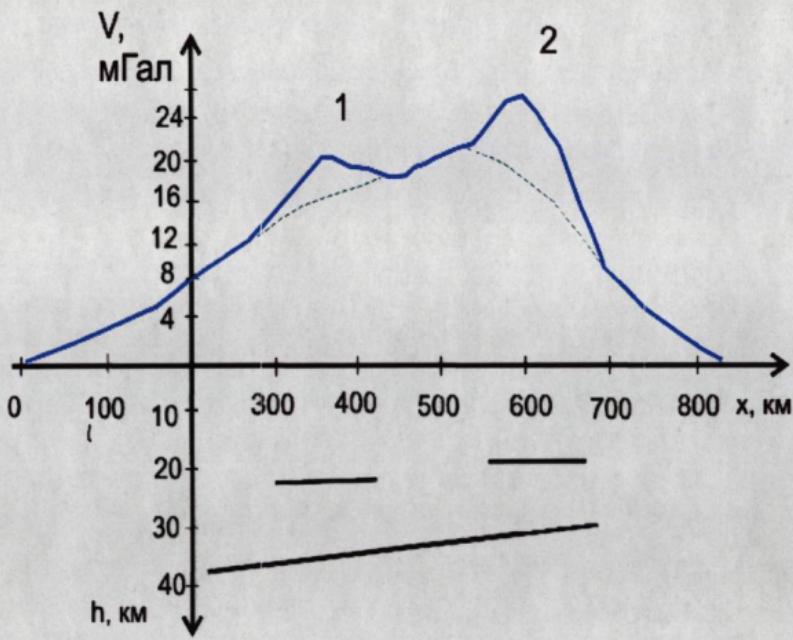


Рис 4.10

Таким образом, разработанные в третьей главе способы интерпретации аномалий силы тяжести с применением значений ее вертикального градиента, опробованы на пяти гравитационных аномалиях двух региональных профилей, проходящих в северо-западной части Египта, входящей в пределы северной части Западной Пустыни (две аномалии) и через территорию так называемого Балхашского сегмента в юго-восточной части Казахстана (три аномалии). Для всех пяти аномалий найдены максимальные значения шести функций d , d_1 , d_2 и A_1 , A_2 , A_3 , по которым определены форму источников гравитационного поля, глубину их залегания и размеры.

Результаты опробования показали на достаточную простоту применения способов и на хорошую сходимость получаемых данных по всем шести способам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении перечислены результаты проведенных исследований. К основным из них относятся следующие.

Приведен аналитический обзор существующих на практике способов практического определения значений вертикального градиента гравитационного поля. Показано, что все они являются громоздкими, не очень удобными для вычисления и поэтому мало применяемыми на практике.

Проведен анализ методики учета поправки за высоту пунктов наблюдений и за аномальный вертикальный градиент поля при высокоточных гравиметрических работах.

Показано, что над источниками гравитационного поля могут наблюдаться значения вертикального градиента, по амплитуде превышающего погрешность измерений в несколько раз. При малых глубинах залегания источников вариации вертикального градиента могут быть более интенсивными, чем вариации исходно гравитационного поля. Поэтому их значения можно использовать при мониторинге разработки месторождений нефти и газа.

Показано также, что изменение плотности пластового флюида и водонасыщенных глинистых пород при снижении пластового давления в результате эксплуатации месторождений может привести к изменению гравитационного поля и его вертикального градиента. Из рассмотренных причин на значения гравитационного поля более сильное влияние оказывает изменение плотности нефти по сравнению с изменениями плотности пластовой воды и водонасыщенных глинистых пород. Эти изменения аномалий силы тяжести и значений ее вертикального градиента необходимо учесть как помех при контроле разработки нефтегазовых месторождений.

Разработаны основные положения использования вертикального градиента гравитационного поля при мониторинге разработки месторождений нефти и газа.

Разработаны способы интерпретации аномалий по совместному анализу значений вертикальной и горизонтальной производных гравитационного поля первого порядка.

Разработаны способы совместной интерпретации вертикального градиента исходного гравитационного поля, значений второй вертикальной производной и спектров аномалий.

Получены аналитические выражения соответствующих функций, найденных в результате опробования разработанных способов интерпретации аномалий на примерах гравитационного поля от наиболее применяемых на практике модельных тел правильной формы.

Проведен анализ полученных выражений, определены закономерности их изменения в зависимости от различных параметров источников полей.

Разработана методика совместного анализа значений вертикального градиента с другими элементами гравитационного поля.

Показано, что основное преимущество разработанных способов совместной интерпретации вертикального градиента гравитационного поля с значениями других его элементов заключается в их чувствительности к форме источников поля. Они позволяют определить в первую очередь форму аномальных тел, а после и другие их параметры – глубину залегания, размеры и массу. Определение формы тел в начале интерпретации уменьшает неоднозначность решения обратной задачи гравиразведки, позволяет получать более достоверные и надежно данные о геометрии и местоположении источников поля.

Предложены наиболее удобные для практических вычислений способы определения вертикального градиента гравитационного поля. Способы опробованы с построением карт аномалий вертикального градиента

и значений вторых вертикальных производных на гравитационном поле одной из площадей в Тюменской области. В результате такого опробования получен ряд новых аномалий, связанных со структурами осадочного чехла, перспективных на наличие скоплений нефти и газа.

Рассмотрена методика применения и проведено опробование всех разработанных способов, основанных на применении функций d , d_1 , d_2 и A_1 , A_2 , A_3 , на пяти аномалиях силы тяжести двух региональных профилей, проходящих в разнородных геологических условиях в северо-западной части Египта и в юго-восточной части Казахстана.

Полученные результаты удовлетворительно совпадают с имеющимися геолого-геофизическими данными.

Список литературы

1. Андреев Б.А., Клушин И.Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. Л., Гостоптехиздат, 1962. -495 с.
2. Антонов Ю.В., Зубченко Е.А., Слюсарев С.В., 1990, Природа аномалий вертикального градиента силы тяжести над горными сооружениями Южного Тянь Шаня: Изв. вузов. Геология и разведка, 7, 102-106.
3. Антонов Ю.В., Слюсарев С.В., 1994, Геологическое истолкование вертикального градиента силы тяжести над горными сооружениями Средней Азии: Изв. вузов. Геология и разведка, 5, 129 – 133.
4. Антонов Ю.В., Жаворонкин В.И., Слюсарев С.В., 2001, Лискинская аномалия вертикального градиента силы тяжести: Вестник Воронежского госуниверситета, 11, 204 – 209.
5. Антонов Ю.В., Жаворонкин В.И., Слюсарев С.В., 2003, Изостатическое равновесие в верхней части земной коры: Геофизика, 6.
6. Антонов Ю.В., 2005, Плотностные неоднородности в земной коре: Геофизика, 1, 62 – 68.
7. Антонов Ю.В., Силкин К.Ю. Черников К.С., 2006, Карта вертикального градиента силы тяжести Центральной части Воронежского массива. Геофизика, 3, 53 -56.
8. Басниев К.С., Власов А.М., Коцина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1986, 303с.
9. Бат М. Спектральный анализ в геофизике. М., Недра, 1980, 535с.
10. Блох Ю.И. Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. М, МГГА, 1998, 88с.
11. Бродовой В.В. Комплексирование геофизических методов. М., Недра, 1991, 330с.
12. Бычков С.Г., 2005, Особенности обработки результатов современной гравиметрической съемки: Геофизический вестник, 12, 9 – 13.

13. Булычев А.А. Совместное использование альтиметрических, набортных гравиметрических и магнитных данных при изучении тектоносферы южного океана. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М., МГУ, 2000 г.
14. Булычев А.А., Гилод Д.А., Зайцев А.Н. и др. 2002, Строение тектоносферы моря Скоша на основе анализа гравиметрических данных: Вестн. Моск. Ун-та, Сер. 5. Геология, 4, 69 – 80.
15. Веселов К.Е., Сагитов М.У., Гравиметрическая разведка. М.: Недра, 1968, 512 с. с илл.
16. Веселов К.Е. Гравиметрическая разведка. –М.: Недра, 1986.
17. Вольфганг Торге. Гравиметрия. –М.: Мир, 1999, 429 с.
18. Гайнанов А.Г. Гравиметрические исследования земной коры океанов. М.: МГУ, 1980, 240 с.
19. Гайнанов А.Г., Пантелеев ВЛ. Морская гравиразведка. –М.: Недра, 1991, 214 с.
20. Геотектоническое районирование Казахстана по геофизическим данным. –М.: Недра, 1969.
21. Гладкий К.В. Гравиразведка и магниторазведка. -М.: Недра, 1967.
22. Гладкий К.В., Серкеров С.А. Дополнительные главы гравиразведки и магниторазведки. МИНГ им. И.М.Губкина, 1976, 61 с. с илл.
23. Гладкий К.В., Серкеров С.А. Преобразование Фурье и их приложения в гравиразведке и магниторазведке. МИНГ им. И.М.Губкина, 1974, 72 с. с илл.
24. Голиздра Г. Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры. –М.: Недра, 1988, 212 с.
25. Гольцман Ф.М., Калинина Т.Б. Статистическая интерпретация магнитных и гравитационных аномалий. Л., Недра. 1983, 248 с.
26. Гравиразведка, Справочник геофизика,-М.: Недра, 1990, 706 с.
27. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли.-М: Наука, 1976, 512 с.

28. Клушин И.Г. Комплексное применение геофизических методов для решения геологических задач. –Л.: Недра, 1968, 312 с.
29. Колюбакин В.В., Лапина М.И. Обзор способов решения прямой и обратной задач магнитной разведки. Труды ИФЗ РАН, № 13 (180), -М.: 1960, 360 с.
30. Комплексирование методов разведочной геофизики. Справочник геофизика.-М: Недра, 1984, 384 с.
31. Костицын В.И. Методы и задачи детальной гравиразведки. – Иркутск: Издательство Иркутского университета, 1989, 128 с.
32. Костицын В.И., Колосов А.И. Геофизическая кибернетика. - Пермь, ПГУ, 1989, 96 с.
33. Куний Н.Я. Комплексирование геофизических методов при геологических исследованиях.-М.: Недра, 1972, 272 с.
34. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. -Л.: Недра, 1973, 350 с.
35. Луговенко В.Н. Статистический анализ аномального магнитного поля. – М.: Недра 1974, 200 с., с илл.
36. Ляндрес А.Ю. Интерпретация гравитационных аномалий с применением вертикального градиента поля и значений его спектра Фурье. (Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России»), М., РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 29-30 января 2007 г., т.1, с. 66-67.
37. Ляндрес А.Ю. О возможности интерпретации аномалий гравитационного поля с применением эталонного тела. (Материалы 7-1 Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы состояния и развитии нефтегазового комплекса России»). М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 29-30 января 2007 г., т. 1, с. 43.

38. Ляндрес А.Ю. Применение вертикального градиента гравитационного поля и его спектра Фурье при интерпретации аномалий. Изв. Вузов. Нефть и газ. № 5, 2007, с. 20-23.
39. Ляндрес А.Ю. Интерпретация аномалий гравитационного поля с применением значений его вертикального градиента. Электронное научное издание «Георазрез». Выпуск №1-2008(1). <http://georazrez.uni-dubna.ru>
40. Магниторазведка. Справочник геофизика. –М.: Недра, 1990, 470 с. с илл.
41. Маловичко А.К., Костицын В.И., Тарунина О.Л. Детальная гравиразведка на нефть и газ. –М.: Недра, 1989, 224 с., с илл.
42. Маловичко А.К., Костицын В.И. Гравиразведка. –М.: Недра, 1992, 357
43. Мелихов В.Р. Устойчивая численная обработка и интерпретация гравитационных наблюдений на основе спектральных преобразований. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М., МГУ, 1988, 438 с.
44. Миронов В.С. Курс гравиразведки.-М.: Недра, 1980, 543 с.
45. Немцов Л.Д. Высокоточная гравиразведка. –М.: Недра, 1967, 237 с.
46. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. М., Недра, 1979, 280 с., с илл.
47. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М., Недра, 1986, 342 с., с илл.
48. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов. Изд. ГЕРС, 2004. – 294 с., с илл.
49. Серкера С.А. Корреляционные методы анализа в гравиразведке и магниторазведке. –М.: Недра, 1986, 274 с.
50. Серкера С.А. Гравиразведка и магниторазведка. –М.: Недра, 1999, 437 с., с илл.

51. Серкеров С.А. Теория потенциала в гравиразведке и магниторазведке. -М.: Недра, 2000 350 с., с илл.
52. Серкеров С.А. Спектральный анализ гравитационных и магнитных аномалий. -М.: Недра, 2002, 437 с., с илл.
53. Серкеров С.А. Гравиразведка и магниторазведка в нефтегазовом деле. М., изд. Нефть и газ, 2006, 512 с., с илл.
54. Серкеров С.В. Гравиразведка и магниторазведка: основные понятия, термины, определения. М., Недра, 2006, 480 с., с илл.
55. Серкеров С.А., Ляндрес А.Ю. Определение гравитационного влияния от изменения масс в пластах при снижении пластового давления. Известия вузов. Нефть и газ, № 4, 2006, с. 25-32.
56. Серкеров С.А., Копунов С.Э., Ляндрес А.Ю. О необходимости учета поправки за аномальный вертикальный градиент при высокоточных гравиметрических работах. Известия вузов. Нефть и газ, № 6, 2006, с. 24-30.
57. Серкеров С.А., Ляндрес А.Ю. Гравитационные эффекты от изменений масс в породах, связанных со снижением пластового давления. Технологии нефти и газа, № 6, 2006, с. 72-77.
58. Серкеров С.А., Ляндрес А.Ю. Возможности применения вертикального градиента гравитационного поля. В сб. трудов кафедры общей и прикладной геофизики Университета «Дубна». -М.: РАЕН, 2007, с. 194-202.
59. Серкеров С.А., Ляндрес А.Ю. Определение формы и параметров тел по значениям вертикального градиента гравитационного поля. В сб. трудов кафедры общей и прикладной геофизики Университета «Дубна». -М.: РАЕН, 2007, с. 203-208.
60. Страхов В.Н. К вопросу о неоднозначности решения обратной задачи гравиметрии. -В кн.: Прикладная геофизика, -М., 1972, вып. 69, с. 115-140.

61. Страхов В.Н., Лапина М.И. О неоднозначности решения обратной задачи магнитометрии. –В кн.: Магнитные аномалии земных глубин, -Киев, Наукова думка, 1976, с. 185-200.
62. Страхов В.Н., Лапина М.И. Определение интегральных характеристик возмущающих масс аппроксимационным методом в задачах гравиметрии и магнитометрии. Изв. АН СССР, серия физика Земли, -М.: Наука, 1975, № 4, с. 40-75.
63. Страхов В.Н. Линейный анализ потенциальных полей. Прикладная геофизика, вып. 83, 1976, с. 115-130.
64. Судариков Ю.А., Серкеров С.А., Холин А.И., Шрайбман В.И. Использование геолого-геофизических данных для изучения региональной тектоники нефтегазовых областей. –М.: Недра, 1976, 168 с.
65. Тархов А.Г., Бондаренко В.М., Никитин А.А. Комплексирование геофизических методов. –М.: Недра, 1982.
66. Черноглазов В.Н. Прогнозирование деформаций осадочных пород по данным ГИС при разработке месторождений. Геофизика, № 1, 2001, с. 74-78.
67. Харитонов А.Л. Применение элементов корреляционной теории для анализа и интерпретации аномального магнитного поля. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. –М.: ИЗМИРАН, 1984, 255 с.
68. Хмелевский В.К. Геофизические методы исследований земной коры –Дубна, изд. МУПОР, 1997, 267 с.
69. Шрайбман В.И., Жданов М.С., Витвицкий О.В. Корреляционные методы преобразования и интерпретации геофизических аномалий. М. Недра, 1977, 237 с., с илл.
70. Яновский Б.М. Земной магнетизм. –Л.: ЛГУ, 1978, 591 с.
71. Spector A. And Crant F.S. Statistical models for interpreting aeromagnetic date/Geophysics. V. 35. № 2, April, 1970.