

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Геологический факультет

УТВЕРЖДАЮ
и.о. декана Геологического факультета
чл.-корр. РАН _____/Н.Н.Ерёмин/
« ____ » _____ 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Прямая и обратная задачи гравиразведки и магниторазведки

Direct and inverse problems of gravity and magnetic

Авторы-составители:

Кузнецов К.М., Булычев А.А., Лыгин И.В.

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

05.04.01 Геология

Магистерская программа

Геофизика

Форма обучения:

Очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Учебно-методическим Советом Геологического факультета
(протокол № _____, _____)

Москва 2022

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки «Геология» (программы, магистратуры).

ОС МГУ утвержден решением Ученого совета МГУ имени М.В.Ломоносова от __ декабря 2022 года (протокол №__).

Год приема на обучение: 2022

© Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения факультета.

Цель и задачи дисциплины

Целью курса «Прямая и обратная задачи гравиразведки и магниторазведки» является изучение подходов и методов решения прямых задач гравиразведки и магниторазведки для сложных моделей, способов выделения полезного сигнала и методов решения обратных задач грави- и магниторазведки.

Задачи - приобретение теоретических знаний и практических навыков реализации математического аппарата решения прямых задач гравиразведки и магниторазведки, выделения целевых аномалий геопотенциальных полей и решения обратных задач.

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

В курсе «Прямая и обратная задачи гравиразведки и магниторазведки» рассматриваются основы аналитических и численных методов решения прямой задачи гравиразведки и магниторазведки для сложных моделей распределения масс и намагниченностей. Исследуются способы выделения полезного сигнала из наблюдаемых полей. Анализируются основные вопросы решения обратных задач, рассматриваются алгоритмы нахождения параметров объектов по их аномальным полям.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП – относится к профессиональному блоку вариативной части ОПОП, модуль «гравиразведка и магниторазведка», является дисциплиной по выбору. Курс – II, семестр – 3.

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

обучающийся должен владеть базовыми естественно-научными, математическими и профессиональными знаниями в объеме вступительного экзамена в магистратуру, а также знаниями дисциплин «Геофизические методы исследования», «Теория геофизических полей», «Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий», «Детальная гравиразведка и магниторазведка», «Структурная и региональная гравиразведка и магниторазведка».

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников (коды)	Индикаторы (показатели) достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине, сопряженные с компетенциями
ОПК-1.ММ Способен применять на практике знания фундаментальных и прикладных разделов дисциплин, определяющих направленность подготовки, при решении задач профессиональной деятельности (формируется частично).	ММ-ОПК-1. И-1. Использует на практике знания фундаментальных и прикладных разделов дисциплин, определяющих направленность подготовки, при решении исследовательских и прикладных задач профессиональной деятельности.	<i>Знать:</i> подходы и методы решения прямых и обратных задач гравиразведки и магниторазведки. <i>Уметь:</i> математически описать физическое поле, создаваемое различными источниками, выполнять математическое моделирование физических полей, выделять полезную составляющую из наблюдаемого сигнала, находить параметры объектов, создающие исходные поля
ОПК-3.ММ Способен в процессе решения профессиональных	ММ.ОПК-3. И-1. Владеет навыками самостоятельного	<i>Знать:</i> подходы и методы решения обратных задач гравиразведки и магниторазведки.

<p>задач самостоятельно получать, интерпретировать и обобщать результаты, разрабатывать рекомендации по их практическому использованию (формируется частично).</p>	<p>получения результатов при решении задач профессиональной деятельности. ММ.ОПК-3. И-2. Объективно оценивает полученные результаты, обобщает их, формулирует выводы. ММ.ОПК-3. И-3. Использует полученные результаты для выработки рекомендаций по их практическому использованию.</p>	<p>Уметь: выделять полезную составляющую из наблюдаемого сигнала, находить параметры объектов, создающие исходные поля</p>
<p>ОПК-5.ММ Способен использовать современные вычислительные методы и компьютерные технологии для решения задач профессиональной деятельности (формируется частично).</p>	<p>ММ.ОПК-5. И-1. Выбирает способы обработки данных и программные средства для решения задач профессиональной деятельности с учетом основных требований информационной безопасности.</p>	<p>Знать: подходы к применению современных вычислительных технологий прямых и обратных задач гравirazведки и магниторазведки. Уметь: программно реализовывать алгоритмы решения прямых и обратных задачи гравirazведки и магниторазведки. Владеть: методами решения прямой и обратной задач гравirazведки и магниторазведки с применением современного вычислительного программного обеспечения.</p>
<p>ПК-1.ММ Способен самостоятельно проводить научные исследования с помощью современного оборудования, информационных технологий, с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (формируется частично).</p>	<p>ММ.ПК-1. И-3. Обрабатывает полученные результаты, формулирует выводы и рекомендации по использованию полученных результатов. ММ.ПК-1. И-4. Представляет результаты своей научной деятельности в письменной и устной форме (отчеты,</p>	<p>Знать: современные подходы и методы при решении прямых и обратных задач гравirazведки и магниторазведки, выделения полезного сигнала. Уметь: выбирать оптимальный подход и средства для решения прямых и обратных задач гравirazведки и магниторазведки, выделения полезного сигнала</p>

	статьи, доклады и презентации).	
--	---------------------------------	--

4. Объем дисциплины составляет **2** з.е., в том числе **28** академических часов на контактную работу обучающихся с преподавателем (**20** часов лекции и **8** часов семинаров), **2** часа – групповые консультации, **8** часов – мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации **44** академических часа на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации – экзамен.

5. Формат обучения не предполагает электронного обучения и использования дистанционных образовательных технологий (за исключением форс-мажорных обстоятельств – пандемии и т.п.).

6. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических или астрономических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, Форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, часы</i>				Самостоятельная работа обучающегося <i>Виды самостоятельной работы, часы</i>				
		Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного типа	Занятия семинарского типа	Всего	Расчетно-графические работы	Работа с литературой (включая подготовку доклада)	Подготовка реферата	Подготовка к контрольному опросу	Всего
Раздел 1. Введение. Понятие прямой задачи гравirazведки и магниторазведки	8	2		1	3	5				5
Раздел 2. Преобразование систем координат, формулы понижения кратности интегралов. Прямая задача гравиметрии и магнитометрии для произвольных однородных многогранников	10	4		1	5				5	5
Раздел 3. Применение теории функции комплексной переменной при решении прямых двухмерных задач гравirazведки и магниторазведки	10	4		1	5	5				5
Раздел 4. Представление элементов гравитационного и магнитного	10	4		1	5	5				5

полей рядами. Спектральное представление										
Раздел 5. Численные методы расчета гравитационных и магнитных аномальных полей	8	2		1	3				5	5
Раздел 6. Способы обнаружения и разделения аномалий. Трансформации полей	9	2		2	4	5				5
Раздел 7. Вопросы единственности и устойчивости решения обратных задач. Способы решения линейной и нелинейной обратной задачи, особые точки	9	2		1	3			6		6
Промежуточная аттестация <i>экзамен</i>	8	<i>Устный экзамен</i>				8				
Итого	72	28				44				

Содержание лекций, семинаров

Содержание лекций

Раздел 1. Введение. Понятие прямой задачи гравиразведки и магниторазведки

Краткое описание курса. Рекомендуемая литература. Основные определения прямых и обратных задач гравиразведки и магниторазведки, единицы измерения. Описание аналитического и численного подходов к их решению. Основные интегральные соотношения и гравитационные и магнитные эффекты элементарных источников. Описание принципов построения моделей среды, отражающих физико-геологическую ситуацию. Описывается влияние детальности модели на результаты численного решения прямых задач. Некорректность обратной задачи гравиразведки и магниторазведки.

Раздел 2. Преобразование систем координат, формулы понижения кратности интегралов. Прямая задача гравиметрии и магнитометрии для произвольных однородных многогранников

Рассматривается математический аппарат перехода из одной декартовой системы координат в другую. Формулы понижения кратности интегралов: формула Остроградского-Гаусса, формулы Грина. Излагается алгоритм вычисления гравитационного потенциала и его производных многогранника (трехмерная задача) и многоугольника (двухмерная задача). Описывается применение преобразования системы координат и формул понижения кратности при решении прямой задачи гравиметрии и магнитометрии для произвольных однородных многогранников.

Раздел 3. Применение теории функции комплексной переменной при решении прямых двухмерных задач гравиразведки и магниторазведки

Вводится понятие комплексной напряженности гравитационного и магнитного полей. Рассматривается поле притяжения и магнитное поле двумерного точечного источника (бесконечной материальной линии). Описываются комплексные потенциалы и их производные для модели бесконечной материальной линии. Рассматривается теорема Пуассона о связи гравитационного и магнитного полей. Рассматриваются комплексные напряженности гравитационного и магнитного полей от элементарных моделей и многоугольников.

Раздел 4. Спектральное представление элементов гравитационного и магнитного полей

Рассматривается представление гравитационных и магнитных аномалий с помощью интегралов Фурье (спектральных функций). Основы преобразования Фурье, и его основные свойства. Рассматриваются спектры аномальных эффектов для материальной тонкой линии. Рассматриваются спектральные характеристики производных потенциала. Рассматриваются основы вычисления аномальных эффектов для сред со сложным распределением плотности и намагниченности на основе уравнения типа свертки.

Раздел 5. Численные методы расчета гравитационных и магнитных аномальных полей

Рассматриваются особенности численных решений прямых задач гравиразведки и магниторазведки. Описываются источники погрешности вычислений. Рассматриваются примеры для описания погрешности метода получения результата. Рассматривается погрешность округления при реализации на ЭВМ. Рассматриваются особенности аппроксимации моделей распределения плотности и намагниченности, влияние избыточной и недостаточной детализации модели. Описываются подходы к ускорению вычисления на основе применения дискретного преобразования Фурье.

Раздел 6. Способы обнаружения и разделения аномалий. Трансформации полей

Рассматриваются основные подходы к разделению гравитационных и магнитных полей на составляющие. Геологическое редуцирование. Расчет эффекта от известных геологических объектов. Корреляционные и регрессионные методы в задаче выделения полезной аномальной составляющей. Линейные трансформации (фильтрация) на основе сведений о частотном составе полей и их составляющих. Аппроксимационные способы – на основе общих представлений о характере источников и самого поля (истокообразная аппроксимация, полиномиальная и т.п.).

Раздел 7. Вопросы единственности и устойчивости решения обратных задач. Способы решения линейной и нелинейной обратной задачи, особые точки

Рассматриваются основные определения обратной задачи гравиразведки и магниторазведки. Линейная и нелинейная постановка обратной задачи. Поиск плотности или намагниченности объектов на основе минимизации функционала Тихонова. Поиск геометрии объектов на основе минимизации функционала Тихонова. Рассматриваются примеры решения обратных задач. Рассматривается классификация методов решения обратной задачи. Методы особых точек. Применение регуляризирующих алгоритмов при трансформациях гравитационного и магнитного полей.

План проведения семинаров.

1. Написание программ расчета прямой задачи гравиразведки и магниторазведки от элементарных тел;
2. Преобразование систем координат, формулы понижения кратности интегралов при решении прямой задачи гравиметрии и магнитометрии для произвольных однородных многогранников;
3. Решение прямой задачи на основе уравнения типа свертки;
4. Расчет трансформаций гравитационного и магнитного полей с целью выделения полезного сигнала;
5. Изучение вопросов неустойчивости и эквивалентности решения обратной задачи грави- и магниторазведки.

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Текущий контроль усвоения дисциплины осуществляется при сдаче каждым студентом выполненных расчетных работ, рефератов и по результатам контрольных работ.

Примерный перечень вопросов для проведения текущего контроля:

1. Основные соотношения для элементов гравитационного поля и магнитного поля сферы;
2. Основные соотношения для элементов гравитационного поля и магнитного поля бесконечного материального стержня;
3. Соотношение Пуассона о связи гравитационного и магнитного потенциала для изолированного источника;
4. Преобразование системы координат при решении прямой задачи гравиразведки и магниторазведки;
5. Формулы понижения кратности интегралов. Примеры их использования при решении прямых задач гравиразведки и магниторазведки;
6. Алгоритм решения прямой задачи гравиразведки для многоугольника с постоянной плотностью;

7. Алгоритм решения прямой задачи магниторазведки для многоугольника с постоянной намагниченностью;
8. Алгоритм вычисления элементов гравитационного поля от многогранника с постоянной плотностью;
9. Алгоритм вычисления элементов магнитного поля от многогранника с постоянной намагниченностью;
10. Понятие комплексной напряженности гравитационного и магнитного поля;
11. Комплексная напряженность гравитационного и магнитного поля от кругового горизонтального цилиндра,
12. Комплексная напряженность гравитационного и магнитного поля от тонкого пласта;
13. Понятие и примеры трансформации потенциальных полей;
14. Полиномиальное сглаживание поля методом наименьших квадратов;
15. Метод главных компонент выделения региональной составляющей поля;
16. Понятие о линейной фильтрации. Фильтрация в пространственной и частотной областях;
17. Оптимальные фильтры. Фильтр Колмогорова-Винера;
18. Оптимальные фильтры. Согласованный фильтр;
19. Оптимальные фильтры. Энергетический фильтр;
20. Трансформации потенциальных полей на основе интеграла Пуассона;
21. Редукция магнитных аномалий к полюсу;
22. Аппроксимационные подходы к разделению полей;
23. Обратные задачи. Примеры эквивалентности и неустойчивости решений;
24. Линейная обратная задача гравиразведки и магниторазведки.

Расчетные домашние задания:

1. Написание вычислительных программ для вычисления аномального гравитационного и магнитного поля от системы источников простой формы.
2. Написание вычислительных программ для вычисления аномального гравитационного и магнитного поля от многоугольника.
3. Написание вычислительных программ для вычисления аномального гравитационного и магнитного поля сложного распределения плотности и намагниченности на основе спектральные метода.
4. Выделение полезной составляющей сигнала на основе различных трансформаций.
5. Определение параметров объектов, создающих аномальное поле.

Примерный перечень тем рефератов:

1. Решение прямой задачи магниторазведки для тел простой геометрической формы;
2. Решение прямой задачи гравиразведки для тел простой геометрической формы;
3. Решение прямой задачи гравиразведки для многоугольника с постоянной плотностью;
4. Решение прямой задачи магниторазведки для многоугольника с постоянной намагниченностью;
5. Пересчет поля в верхнее полупространство;
6. Подходы к вычислению высших производных гравитационного и магнитного поля;
7. Способы вычисления неустойчивых трансформаций потенциальных полей;
8. Редукция магнитных аномалий к полюсу;
9. Примеры линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки;
10. Примеры нелинейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки

7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации (экзамен):

1. Основные соотношения для элементов гравитационного поля, создаваемого изолированными объектами. Модели объектов.
2. Основные соотношения для элементов магнитного поля, создаваемого изолированными объектами. Модели объектов.
3. Соотношение Пуассона о связи гравитационного и магнитного потенциала для изолированного источника.
4. Преобразование системы координат при решении прямой задачи гравиразведки и магниторазведки (пример – поле от стержня с постоянной плотностью, поле от пластины с постоянной плотностью).
5. Формулы понижения кратности интегралов. Примеры их использования при решении прямых задач гравиразведки и магниторазведки.
6. Алгоритм вычисления гравитационного поля многоугольника с постоянной намагниченностью.
7. Алгоритм вычисления магнитного поля многоугольника с постоянной плотностью.
8. Алгоритм вычисления элементов гравитационного поля от многогранника с постоянной плотностью.
9. Алгоритм вычисления элементов магнитного поля от многогранника с постоянной намагниченностью.
10. Понятие комплексной напряженности гравитационного и магнитного поля.
11. Комплексная напряженность гравитационного и магнитного поля от кругового горизонтального цилиндра, тонкого пласта.
12. Общие принципы интерпретации гравитационных и магнитных аномалий, задача выделения полезного сигнала. Понятие трансформации поля.
13. Полиномиальное сглаживание поля методом наименьших квадратов (регрессионный анализ).
14. Метод главных компонент выделения региональной составляющей поля.
15. Понятие о линейной фильтрации. Фильтрация в пространственной и частотной областях.
16. Оптимальные фильтры. Фильтр Колмогорова-Винера.
17. Оптимальные фильтры. Согласованный фильтр.
18. Оптимальные фильтры. Энергетический фильтр.
19. Трансформации потенциальных полей на основе интеграла Пуассона.
20. Редукция магнитных аномалий к полюсу.
21. Неустойчивые трансформации потенциальных полей. Способы решения.
22. Аппроксимационные подходы к разделению полей.
23. Обратные задачи. Примеры эквивалентности и неустойчивости решений.
24. Линейная обратная задача гравиразведки и магниторазведки.

Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине (экзамен).

Результаты обучения, соответствующие виды оценочных средств	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания о подходах и теоретических основах к	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания

решению прямых задач гравиразведки и магниторазведки, выделению полезного сигнала				
Умения реализовывать и применять технологии решения прямых задач гравиразведки и магниторазведки, выбирать оптимальные подходы к фильтрации, трансформации и потенциальных полей	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает неточности непринципиального характера	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы.	Успешное умение.
Навыки решения прямой и обратной задач гравиразведки и магниторазведки с применением современных вычислительных технологий.	Навыки владения отсутствуют	Фрагментарное владение методами, наличие отдельных навыков.	В целом сформированные навыки.	Свободное владение и использование .

8. Ресурсное обеспечение:

А) Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

1. Булычев А.А., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М. Прямая задача гравиразведки и магниторазведки (конспект лекций). Учебное — Университетская книга Москва, 2019. — 176 с.
2. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Учебное пособие. 2009. 232 с. (www.sigma3d.com).
3. Страхов В.Н. Методы интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. — Пермь: ПГУ, 1984, 71 с.

- дополнительная литература:

1. Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. — М., Научный мир. 2007. 710 с.

2. Булычев А.А., Лыгин И.В. Мелихов В.Р. Численные методы решения прямых задач грави- и магниторазведки (конспект лекций). Учебное пособие. – Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. 2010. 164 с.

Б) Перечень программного обеспечения:

- нелицензионные

- Специальные вычислительные и логические компьютерные программы, созданные сотрудниками и преподавателями кафедры геофизических методов исследований земной коры Геологического факультета МГУ.

В) Материально-технического обеспечение:

Помещения – компьютерный класс, рассчитанный на группу из 15 учащихся;

Оборудование – персональные компьютеры, мультимедийный проектор, экран, выход в Интернет.

9. Язык преподавания – русский.

10. Преподаватели:

Ответственный за курс — Кузнецов Кирилл Михайлович.

Преподаватели: Кузнецов К.М., Булычев А.А., Лыгин И.В.

11. Разработчики программы: Кузнецов К.М., доцент; Булычев А.А., профессор; Лыгин И.В., доцент.