

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

УТВЕРЖДАЮ
Декан геологического
факультета, чл.-корр. РАН
Еремин Н.Н.



«25» сентября 2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Сейсмо-гравитационное моделирование

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 МГУ
(протокол № 6 от 8 сентября 2025)

Москва 2025

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», утвержденным приказом по МГУ от 30.12.2016 № 1674 (в действующей редакции).

Год приема на обучение: 2024.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП. Относится к профильному блоку вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору. Курс магистратуры – 2, 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 «Общая геология», «Геофизические методы исследования», «Теория геофизических полей», «Комплексирование геофизических методов», «Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий», «Структурная и региональная гравиразведка и магниторазведка».

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

Компетенции выпускников (коды)	Индикаторы достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с индикаторами достижения компетенций
ОПК-2.М	ММ.ОПК-2. И-1. Определяет цель, задачи, обосновывает актуальность и разрабатывает логическую схему проекта в профессиональной области. ММ.ОПК-3. И-2. Формулирует методику решения исследовательских задач на основе классических подходов и инновационных идей геологических и смежных наук.	Знать: основные принципы комплексного анализа гравиразведочных и сейсморазведочных данных, особенности современных методов, подходов и технологий совместной интерпретации данных сейсморазведки и гравиразведки с учетом петрофизической и геологической обстановки. Уметь: выбрать и обосновать оптимальную методику исследования; последовательность методов и процедур интерпретации гравиразведочных и сейсморазведочных данных, обеспечивающую эффективное решение поставленной задачи.
ОПК-5.ММ	ММ.ОПК-5. И-1. Выбирает способы обработки данных и программные средства для решения задач профессиональной деятельности с учетом	Знать: особенности современных методов, подходов и технологий совместной интерпретации данных гравиразведки и сейсморазведки,

	основных требований информационной безопасности. М.ОПК-5. И-2. Использует ГИС-технологии для решения профессиональных задач. М.ОПК-5. И-3. Использует компьютерные, в т.ч. ГИС-технологии для представления результатов исследований.	обеспечивающих максимальный учет геологических параметров объекта. Уметь: активно использовать и модернизировать современные средства и технологии интерпретации гравиразведочных и сейсморазведочных данных; выбрать и обосновать последовательность методов и технологий совместной интерпретации, обеспечивающую эффективное решение поставленной задачи; построить наглядные результативные модели.
МПК-1	МПК-1. И-1 Определяет цели и задачи геофизических исследований. МПК-1. И-2 Владеет методами проведения геофизических наблюдений и обработки данных. МПК-1. И-3 Знает основы решения прямых и обратных задач геофизики, геологической интерпретации данных.	Знать: современные методы обработки и интерпретации комплексной геологической, гравиметрической, и сейсморазведочной информации, формальные и неформальные способы учета априорной геологической информации, применяемые при решении сложных геологических задач. Уметь: творчески, с учетом особенностей геологического объекта и задач и стадии исследований, использовать современные методы совместной интерпретации данных сейсморазведки и гравиразведки, выбрать оптимальную методику комплексного анализа геоданных и применить ее для решения конкретной геолого-геофизической задачи, строить наглядные и геологически значимые результативные 2Д и 3Д решения (разрезы и объемные модели).

4. Объем дисциплины 2 з.е., в том числе 28 академических часов на контактную работу обучающихся с преподавателем (лекции 20, семинары 8), 44 академических часов на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации – экзамен.

5. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов 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 докладов)	Подготовка реферата	Подготовка к контрольному опросу	Всего
Раздел 1. Комплексный анализ сейсморазведочных и гравиразведочных данных.	16	4	4	2	10	4			2	6
Текущая аттестация 1: доклад с презентацией	12			2	2		5	5		10
Раздел 2. Методика двумерного сейсмо-гравитационного моделирования.	14	2	4	2	8	4			2	6
Текущая аттестация 2: доклад с презентацией	12			2	2		5	5		10
Раздел 3. Основы трехмерного сейсмо-гравитационного моделирования.	6	2		2	4				2	2

Текущая аттестация 3: <i>защита реферата</i>	12			2	2		4	6		10
Всего	72	8	8	12	28					34
Промежуточная аттестация <u>экзамен</u>	0	<i>Устный экзамен</i>				0				
Итого	72	28				44				

Содержание лекций и семинаров

Раздел 1. Комплексный анализ сейсморазведочных и гравиразведочных данных.

1.1. Физические основы совместного анализа сейсморазведочных и гравиразведочных данных.

История развития направления сейсмо-гравитационного моделирования. Геолого-геофизические задачи, требующие совместного анализа сейсморазведочных и гравиразведочных данных. Петрофизическая основа связи упругих параметров и плотности горных пород. Эмпирические зависимости скорость-плотность для различных регионов, условий залегания и типов горных пород. Подходы и алгоритмы совместного анализа сейсморазведочных и гравиразведочных данных

1.2. Модели внутреннего строения Земли по данным сейсмологии и гравиметрии.

Элементы сейсмологии. Определение массы и глобальных особенностей распределения плотности планеты по её гравитационному полю. Сейсмологические, сейсмотомографические и плотностные модели Земли. Решение прямой задачи гравиразведки на сфере. Методы согласования сейсмологических и плотностных моделей Земли. Глобальные модели границы Мохоровичича по сейсмическим и гравиметрическим данным. Анализ уточненной модели земной коры CRUST1.0 и ее гравитационного поля.

Раздел 2. Методика двумерного сейсмо-гравитационного моделирования.

Особенности методики выполнения совместных детальных полевых профильных сейсморазведочных и площадных гравиразведочных работ. Методика построения двумерной сейсмоплотностной модели, удовлетворяющей наблюдаемому гравитационному полю, условию изостатической уравновешенности модели, степени корреляции между значениями плотности и сейсмической скорости в выделенных частях модели и другим параметрам. Подходы учета априорной геолого-геофизической информации при региональных и малоглубинных сейсмо-гравитационных исследованиях. Примеры согласованных двумерных сейсмо-гравитационных моделей вдоль региональных профилей глубинного сейсмического зондирования.

Раздел 3. Современные подходы трехмерного сейсмо-гравитационного моделирования.

Построение согласованной трехмерной сейсмо-гравитационной модели на основе сейсмического куба данных и детальных материалов гравитационного поля. Роль данных геофизических исследования скважин при установлении корреляционных связей плотность – скорость. Предельные оценки чувствительности (возможности) гравитационных исследований для различных геологических задач. Итерационный метод уточнения скоростного закона на стадии обработки сейсмических данных путем согласования зависимости скорость-плотность и построения плотностной модели, не противоречащей гравитационному полю. Примеры трехмерного сейсмо-гравитационного моделирования. Перспективные направления развития комплекса сейсморазведка-гравиразведка.

План проведения семинаров.

Раздел 1. Комплексный анализ сейсморазведочных и гравиразведочных данных.

1.1. Подходы и алгоритмы совместного анализа сейсморазведочных и гравиразведочных данных.

Обсуждение методики комбинированного сеточно-блокового моделирования для построения слоистых и слоисто-блоковых моделей глубинного строения на основе глубин залегания сейсмических поверхностей, интервальных скоростей, априорной плотностной модели. Анализ критериев выбора геометрических параметров модели (размер элементарной ячейки, учет краевых эффектов) от размеров области моделирования и типа (двумерное или трехмерное) моделирования. Анализ особенностей методов подбора латерального изменения плотности в слое, формы плотностной границы, решения нелинейной трехмерной задачи гравиразведки. Оценка невязки между наблюдаемыми и модельными данными.

1.2. Доклады студентов с презентацией по Разделу 1 «Комплексный анализ сейсморазведочных и гравиразведочных данных».

Физические основы совместного анализа сейсморазведочных и гравиразведочных данных. Модели внутреннего строения Земли по данным сейсмологии и гравиметрии. Подходы и алгоритмы совместного анализа сейсморазведочных и гравиразведочных данных.

Раздел 2. Методика двумерного сейсмо-гравитационного моделирования.

2.1. Совместный анализ профильных сейсморазведочных и площадных гравиразведочных данных.

Анализ корреляционно-статистических методов и методов машинного обучения, направленных на выделение локальной компоненты гравитационного поля, наилучшим образом отвечающей форме сейсмических горизонтов и скоростным аномалиям в заданном интервале глубин. Обсуждение методов построения изогипс заданного (исследуемого целевого) горизонта по результатам комплексной интерпретации площадных данных гравиразведки и профильных данных сейсморазведки.

2.2. Доклады студентов с презентацией по Разделу 2 «Методика двумерного сейсмо-гравитационного моделирования».

Методика двумерного сейсмо-гравитационного моделирования. Совместный анализ профильных сейсморазведочных и площадных гравиразведочных данных.

Раздел 3. Современные подходы трехмерного сейсмо-гравитационного моделирования.

3.1. Обсуждение подходов построения согласованной трехмерной сейсмо-гравитационной модели на основе сейсмического куба данных и детальных материалов гравитационного поля.

3.2. Доклады студентов по темам рефератов. Анализ примеров двумерного и трехмерного сейсмо-гравитационного моделирования.

Расчетные домашние задания:

1. Проверка глубинных моделей строения Земли на соответствие гравитационному полю.
2. Сопоставление гравитационного эффекта разреза с и без учета уплотнения с глубиной.
3. Коррекция глубинно-скоростной модели на основе плотностного моделирования.
4. Площадное восстановление морфологии горизонта по профильным сейсмическим данным и аномалиям поля силы тяжести, заданным на площади, на основе методов машинного обучения.

Примерный перечень тем рефератов:

1. Современные подходы к определению распределения объемной плотности с использованием данных сейсморазведки и ГИС.
2. Современные алгоритмы совместной инверсии гравитационных и сейсмических данных для двумерного и трехмерного моделирования земной коры.
3. Синхронная и последовательная инверсия геофизических данных.
4. Совместная трехмерная инверсия мюонной томографии и гравитационных данных.
5. Геологические результаты практической реализации современных подходов совместной интерпретации сейсморазведочных и гравитационных данных.
6. Построение изображения среды на основе совместной инверсии сейсмических и гравиметрических данных.
7. Комбинированная глобальная модель границы Мохо, построенная на основе сейсмических и гравиметрических данных.
8. Комбинированная модель строения земной коры по данным сейсмической томографии и гравитационному полю.
9. Примеры трехмерного гравитационного моделирования сложных соляных или иных структур (в Южной части Мексиканского залива, в Каспийском регионе, на юге Карского моря, в Поволжье, в Восточной Сибири и др.).
10. Примеры выявления колебания уровня грунтовых вод при мониторинговых измерениях методами сейсморазведки и гравитационной разведки.
11. Совместная инверсия сейсмических и градиентометрических гравиметрических данных.
12. Совместная инверсия сейсмических, магнитотеллурических и гравиметрических данных с использованием структурных ограничений.
13. Изучение соотношений между скоростью сейсмических волн и плотностью в литосфере методом сейсмо-гравитационного моделирования.
14. Достижения в регуляризованной инверсии гравиметрических и электромагнитных данных.
15. Поиск региональных соотношений скорости-плотности земной коры с использованием гравитационного 2D моделирования.

6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине:

6.1. Примерный перечень типовых вопросов при текущей аттестации при проведении контрольных работ и докладов по темам рефератов:

1. Геолого-геофизические задачи, требующие совместного анализа сейсморазведочных и гравиразведочных данных.
 2. Цели сейсмо-гравитационного моделирования.
 3. Петрофизическая основа связи упругих параметров и плотности горных пород.
 4. Эмпирические зависимости скорость-плотность для различных регионов, условий залегания и типов горных пород.
 5. Определение массы и глобальных особенностей распределения плотности планеты по её гравитационному полю.
 6. Сейсмологические, сейсмотомографические и плотностные модели Земли. Решение прямой задачи гравиразведки на сфере.
 7. Модели глобальных моделей границы Мохоровичича по сейсмическим и гравиметрическим данным.
 8. Методика построения сейсмоплотностной модели, удовлетворяющей наблюдаемому гравитационному полю, условию изостатической уравновешенности модели, степени корреляции между значениями плотности и сейсмической скорости в выделенных частях модели.
 9. Роль априорной геолого-геофизической информации при региональных сейсмо-гравитационных исследованиях.
 10. Предельные оценки чувствительности (возможности) гравитационных исследований для различных геологических задач.
- Методы машинного обучения, направленные на построение контактной границы по профильным сейсмическим и площадным гравиметрическим данным.

6.2. Примерный перечень типовых вопросов при промежуточной аттестации (экзамен):

1. Гравитационное поле - источник знаний об истинной форме Земли и о распределении плотности в её внутренних зонах.
2. Сейсмология как метод изучения внутренних процессов и внутреннего строения Земли.
3. Связь сейсмических характеристик с составом и состоянием горных пород. Петрофизическая связь сейсмических параметров и плотности горных пород.
4. Эмпирические зависимости скорость-плотность для различных регионов, условий залегания и типов горных пород. Роль ГИС при установлении этих зависимостей.
5. Возможность построения алгоритма прямой задачи от объемных плотностных разрезов, задаваемых на регулярной сетке - «Куб плотностей» (решение задачи в спектральной области). Критерии выбора геометрических параметров модели.
6. Понятие прямой и обратной задачи гравиразведки. Физико-геологические и математические модели интерпретации.
7. Обратная задача определения избыточной плотности в изолированном объеме. Регуляризирующий алгоритм решения задачи.

8. Сейсмологические модели Земли. Принципы построения согласованной сейсмологической и плотностной модели.
9. Плотностные модели земной коры и литосферы типичных региональных структур и особенности их проявления в физических полях.
10. Проблема разделения потенциальных полей на составляющие. Использование «геологической редукции» как метода разделения полей. Возможные подходы к построению алгоритмов разделения полей.
11. Построение контактной поверхности по гравиметрическим данным и сейсморазведки на эталонном участке. Регуляризирующий алгоритм решения задачи.
12. Корреляционно-статистический подход фильтрации для выделения локальной компоненты гравитационного поля наилучшим образом отвечающей форме сейсмических горизонтов или скоростным аномалиям в заданном интервале глубин.

6.3. Шкала и критерии оценивания

Результаты обучения, соответствующие виды оценочных средств	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания принципов, основных алгоритмов и методики сейсмо-гравитационного моделирования (<i>устный опрос</i>)	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания
Умения целенаправленно, с учетом конечной геологической задачи и масштаба исследований, собрать необходимый данные, выбрать	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает неточности не принципиального характера	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы.	Успешное умение.

оптимальную методику создания согласованной сейсмо-гравитационной модели и применить ее для решения конкретной геолого-геофизической задачи. <i>(устный опрос)</i>				
Владения, опыт деятельности методами сбора информации, методами сейсмо-гравитационного моделирования и способами наглядного изображения результатов. <i>(устный опрос)</i>	Навыки владения отсутствуют	Фрагментарное владение методами, наличие отдельных навыков.	В целом сформированные навыки.	Свободное владение и использование.

7. Ресурсное обеспечение:

7.1. Перечень основной и дополнительной литературы.

Основная литература:

1. Соколова Т.Б., Булычев А.А., Лыгин И.В., Старовойтов А.В., Тевелев Ал.В., Шалаева Н.В. Интерпретация геофизических материалов. УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ. Тверь, ООО "Издательство ГЕРС", 2011. - 208 с.
2. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Учебник для вузов. — Тверь: Изд-во АИС, 2006.
3. Булычев А.А., Лыгин И.В., Соколова Т.Б. и др. Конспект лекций по курсу Гравиразведка: Учеб. пособие. М.: КДУ, "Университетская книга", 2017. 124 с.

Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: ВНИИГеосистем, 2012. 346 с.

Дополнительная литература:

1. Булычев А.А., Лыгин И.В., Мелихов В.Р. Численные методы решения прямых задач грави- и магниторазведки (конспект лекций). М.: отдел оперативной печати геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010. 164 с. (URL: http://geophys01.geol.msu.ru/STUDY/facultet/forward08_03_2011.pdf).
2. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Сейсморазведка. Учебник для студентов ВУЗов в 2-х книгах. Кн.2. Обработка, анализ и интерпретация данных. 2012.
3. Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика. Учебное пособие для геофизических специальностей вузов. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 463 с. ISBN 5-7968-0358-1 (978-5-7968-0358-5)
4. Андреев Б.А., Клушин И.Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. Л.: Недра, 1965. 405 с.
5. Гвишиани А.Д., Диаман М., Михайлов В.О. и др. Алгоритмы искусственного интеллекта для кластеризации магнитных аномалий // Физика Земли. 2002. № 7. С. 13-28.
6. Гольцман Ф.М. Статистические модели интерпретации. М.: Наука, 1971. 327 с.
7. Гольцман Ф.М., Калинина Т.Б. Статистическая интерпретация магнитных и гравитационных аномалий. Л.: Недра, 1983. 248 с.
8. Никитин А.А. Использование статистической теории обнаружения сигналов для выделения слабых геофизических аномалий // Изв. вузов. Геология и разведка. 1977. № 6. С. 77-87.
9. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации КОСКАД 3D // Геофизика. 2000. № 4. С. 29-33.
10. Приезжев И.И. Уточнение геологической модели по данным гравитационного поля на основе критериальных методов решения обратных задач // Геофизика. 2010. № 1. С. 65-68.
11. Серкерев С.А. Корреляционные методы анализа в гравиразведке и магниторазведке. М.: Недра, 1986. 247 с.
12. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А. Нейросетевой метод магнитотеллурического мониторинга геоэлектрических параметров среды на основе неполных данных // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 1. Вып. 11. С. 171-176.
13. Элланский М.М. Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики. М.: Недра, 1978. 254 с.

7.2. Перечень лицензионного программного обеспечения:

- лицензионное:

Программы Microsoft PowerPoint, Microsoft Word;

Программы Golden Software – Surfer (версия 10 или выше) и Golden Software – Grapher (версия 6 или выше);

Программный комплекс GravMagInv

- нелицензионные и свободного доступа:

пакет программ Open Office;

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

7.3. Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

- реферативная база данных издательства Elsevier: www.sciencedirect.com

- Базы, реестры, справочники (свободный доступ, подписки)

- модель морской береговой линии GSHHG и др.;

- модели рельефа морского дна и дневного рельефа Topex-relief, SRTM, ETOPO1 и др.;

- модели аномального гравитационного поля Земли Topex-gravity, WGM2012 и др.;

- модели аномального магнитного поля WDMAM, EMAG2.

- модели земной коры CRUST, мощности осадочного чехла SEDTHICK, литосферы LITHO и др.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости)

- Поисковая система научной информации www.scopus.com

- Электронная база научных публикаций www.webofscience.com

- Обновляемый курс лекций и комплект учебных геологических карт на сайте <http://wiki.web.ru/wiki/>.

- Международный центр глобальных моделей Земли <http://icgem.gfz-potsdam.de/home>.

- Данные о возрасте литосферы http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/ocean_age/data/2008/grids/age/

- Данные о рельефе поверхности Мохо по данным спутниковой миссии GOCE <http://gocedata.comopolimi.it/>

- Программное обеспечение GravMagInv <https://www.gravmaginv.ru/>

7.3. Описание материально-технической базы:

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

Оборудование – персональные компьютеры, мультимедийный проектор, экран.

8. Язык преподавания: русский

9. Преподаватели: доц. Лыгин И.В. (ответственный по дисциплине), проф. Булычев А.А., доц. Кузнецов К.М.

10. Разработчики программы: доц. Лыгин И.В., проф. Булычев А.А., доц. Кузнецов К.М., асс. Фадеев А.А., доц. Коснырева М.В., доц. Золотая Л.А.