

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/

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Моделирование геомиграции**

Автор-составитель: Расторгуев А.В.

**Уровень высшего образования:**

*Бакалавриат*

**Направление подготовки:**

**05.03.01 Геология**

**Направленность (профиль) ОПОП:**

**Гидрогеология, инженерная геология, геоэкология**

Форма обучения:

*Очная*

Рабочая программа рассмотрена и одобрена

Учебно-методическим Советом Геологического факультета

(протокол № \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_)

Москва

---

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

Год (годы) 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.*

## Цели и задачи дисциплины

**Целью** курса " Моделирование геомиграции " является изучение теоретических основ и методов построения моделей геомиграции и формирование устойчивого комплекса базовых знаний о моделировании адвективно-дисперсионного переноса в насыщенной и ненасыщенной области.

### Задачи:

Целями освоения дисциплины «Моделирование геомиграции» являются:

- изучение теоретических основ геомиграционных моделей,
- ознакомление с аналитическими и численно-аналитическими методами решения задач геомиграции,
- освоение основных численных методов решения задач геомиграции и знакомство с современным программным обеспечением,
- решение задачи геомиграции приближенной к реальным условиям, получение навыков геомиграционной схематизации.

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Моделирование геомиграции» входит в вариативную часть блока общепрофессиональной подготовки бакалавра геологии по *Модулю Гидрогеология и инженерная геология* для профилизации «гидрогеология» (ВВ). вариативная часть, профессиональный цикл, курс – IV, семестр – 8.

## 2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

Освоение дисциплины базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин – базовой и вариативной частей блока общенаучной подготовки (ББ, ВБ): «Высшая математика», «Информатика», «Физика», «Химия общая», «Химия физическая, коллоидная», «Теория вероятности и математическая статистика», «Уравнения математической физики», а также на курсах базовой и вариативной частей блока профильной подготовки (БГ, ВГ): «Гидрогеология», «Гидрогеохимия», «Дополнительные главы по гидрогеохимии», «Гидрогеодинамика», «Гидрогеодинамическое моделирование».

## 3. Результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников (коды)	Индикаторы (показатели) достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), сопряженные с компетенциями
ОПК-1.Б Способен применять знания фундаментальных разделов наук о Земле, базовые знания естественно-научного и математического циклов при решении стандартных профессиональных задач (формируется частично).	Б-ОПК-1.1. Использует базовые знания фундаментальных разделов наук естественно-научного и математического циклов в профессиональной деятельности	<b>Знать:</b> – методы решения задач геомиграции аналитическими и численно-аналитическими методами, основные аналитические решения и уметь их применять
ОПК-2.Б. Способен применять	Б-ОПК-2.1. Использует	<b>Знать:</b> методы конечно-разностного решения уравнений конвективной

теоретические основы фундаментальных геологических дисциплин при решении задач профессиональной деятельности (формируется частично).	теоретические знания о закономерностях и особенностях геологических процессов для решения профессиональных задач	дисперсии <b>Владеть:</b> навыками построения структурированных конечно-разностных сеток для решения численными методами геофильтрационных задач условий
ОПК-3.Б Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности в соответствии с профилем подготовки (формируется частично)	. Б.ОПК-3. И-3. Владеет базовыми навыками обработки и интерпретации информации при решении стандартных задач профессиональной деятельности в соответствии с профилем подготовки	<b>Знать:</b> способы решения задач геомиграции методами конечных элементов и конечных объемов <b>Уметь:</b> проводить геомиграционную схематизацию, иметь представление о способах приучения миграционных параметров
СПК-2.Б Способен проводить моделирование изучаемых гидрогеологических, инженерно-геологических и геокриологических процессов	Б-СПК -1.2 Владеет навыками сбора, систематизации и интерпретации данных гидрогеологических исследований для проведения геофильтрационной и геомиграционной схематизации гидрогеологических процессов и связанных с ними инженерно-геологических и геокриологических процессов. Умеет разрабатывать геофильтрационные и геомиграционные модели для достаточно простых гидрогеологических условий, оценивать результаты прогнозных расчетов техногенного влияния на подземные воды	<b>Знать:</b> основные этапы создания геомиграционных моделей реальных объектов <b>Уметь:</b> решать практически важные задачи прогноза распространения загрязняющих веществ в подземной гидросфере, <b>Владеть:</b> - приемами обоснования мероприятий по локализации распространения загрязняющих веществ в подземных водах

**4. Объем дисциплины (модуля)** составляет 2 зачетные единицы или 72 часа, в том числе 22 часа аудиторных занятий (22 часов лекций) и 50 часов внеаудиторных самостоятельных занятий студента. Форма – экзамен.

**5. Формат обучения** – лекции, практические занятия и самостоятельная работа студента

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

**Краткое содержание дисциплины (аннотация):**

Моделирование геомиграции является продолжением курса гидрогеодинамического моделирования. В начале курса показана важность решения задач геомиграции, дан вывод трехмерного уравнения адвективно-дисперсионного уравнения с тензором дисперсии. В курсе даны аналитические методы решения геомиграции на основе метода разделения переменных и интегральных преобразований. В курсе дано представление о численно-аналитических методах решения геомиграции, основанных на аналитических методах решения задач фильтрации и численных методах решения задач адвекции. Рассмотрены методы решения задач геомиграции на основе ортогональной дискретизации. Показана область применения эйлеровских, лагранжевых и эйлеровско-лагранжевых методов. Результаты численного моделирования студенты проверяют на основе сопоставления с расчетами на основе точных аналитических решений. Эффективным способом решения геомиграционных задач является использование методов конечных элементов и конечных объемов (МКО). Метод конечных элементов (МКЕ) демонстрируется с помощью программы Feflow. Реализация метода конечных объемов демонстрируется на основе программы GeRa. Рассмотрены два пути решения задач переменной плотности. Первый на основе совместного решения задачи фильтрации и массопереноса, второй на основе допущения о резкой границе раздела между жидкостями разной плотности. В курсе также изучается миграция загрязняющих веществ через зону аэрации. На основе кода VS2D изучается влияние неоднородного строения на миграцию загрязняющих веществ через зону аэрации.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, часы			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия практического типа	Всего	
Раздел 1. Основные геомиграционные уравнения	<b>6</b>	2	–	<b>2</b>	<b>4</b>
Раздел 2. Аналитические и численно-аналитические методы моделирования геомиграции	<b>10</b>	4	–	<b>4</b>	<b>6</b>
Раздел 3. Методы решения геомиграции на основе ортогональной дискретизации. эйлеровских, лагранжевых и эйлеровско-лагранжевых методов	<b>15</b>	6	–	<b>6</b>	<b>9</b>
Раздел 4. Методы решения геомиграции на основе неортогональной дискретизации(МКЕ,МКО)	<b>15</b>	6	–	<b>6</b>	<b>9</b>
Раздел 5. Решение задач фильтрации переменной плотности	<b>8</b>	2	–	<b>2</b>	<b>6</b>
Раздел 6. Решения задач геомиграции через зону аэрации	<b>8</b>	2	–	<b>2</b>	<b>6</b>
Промежуточная аттестация <u>экзамен</u>	<b>10</b>	<u>экзамен</u>			<b>10</b>
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>22</b>			<b>50</b>

## Содержание лекционных и семинарских занятий

### Введение:

Задачи, решаемые с помощью геомиграционных моделей. Обоснование зон санитарной охраны водозаборов. Прогнозы миграции загрязняющих веществ в подземной гидросфере. Интерпретация трассерных экспериментов и выбор моделей распространения трассеров. Обоснование мероприятий по реабилитации загрязненных водоносных горизонтов.

**1. Основные теоретические положения.** Уравнение конвективной (адвективной) дисперсии в системе координат ориентированной вдоль потока. Уравнение конвективной дисперсии в Декартовой системе координат. Тензор гидродинамической дисперсии. Уравнение конвективной дисперсии в трехмерном случае. Модель двойной пористости для описания геомиграции. Программные коды для решения задач геомиграции.

### **2. Аналитические и численно-аналитические методы моделирования геомиграции**

В курсе даны аналитические методы решения геомиграции на основе метода разделения переменных и интегральных преобразований. конвективной дисперсии с уравнения . Возможности аналитических расчетов показаны на основе программы ATRANS реализующей аналитическое решение Доменико. В курсе дано представление о численно-аналитических методах решения геомиграции, основанных на аналитических методах решения задач фильтрации и численных методах решения задач адвекции. Возможности численно-аналитических методов демонстрируется на основе метода аналитических элементов(МАЭ) , с помощью которого решается задача перехвата горизонтальными дренами загрязненного потока формирующего на свалке.

### **3. Методы решения геомиграции на основе ортогональной дискретизации. эйлеровских, лагранжевых и эйлеровско-лагранжевых методов**

Рассмотрены методы решения задач геомиграции на основе ортогональной дискретизации. Показана область применения эйлеровских, лагранжевых и эйлеровско-лагранжевых методов. Дано представление о численной дисперсии, числах  $Pe$  и  $Cu$  определяющих пространственную дискретизацию. Результаты численного моделирования студенты проверяют на основе сопоставления с расчетами на основе точных аналитических решений. Для численных расчетов применяются программы, специально подготовленные для курса и код MT3DMS.

### **4. Методы решения геомиграции на основе неортогональной дискретизации(МКЕ,МКО)**

Эффективным способом решения геомиграционных задач является использование методов конечных элементов и конечных объемов(МКО). Метод конечных элементов (МКЕ) демонстрируется с помощью программы Feflow, с помощью которой решается приближенной к реальным условиям задача распространения ореола загрязненных подземных вод с территории свалки к реке и водозаборной скважине. Реализация метода конечных объемов демонстрируется на основе программы GeRa.

### **5. Решение задач фильтрации переменной плотности**

Рассмотрены два пути решения задач переменной плотности. Первый на основе совместного решения задачи фильтрации и массопереноса, второй на основе допущения о резкой границе раздела между жидкостями разной плотности. В курсе приведены математические постановки соответствующие описанным выше подходам. Проводится решение задачи интрузии морских на основе этих представлений.

### **6. Решения задач геомиграции через зону аэрации**

Загрязнение подземных вод очень часто происходит через зону аэрации. Дана математическая постановка решения геомиграции через зону неполного насыщения. На основе кода VS2D изучается влияние неоднородного строения зоны аэрации на миграцию через нее загрязняющих веществ.

## **Содержание лабораторных занятий**

1. Решить методом разделения переменных одномерное стационарное уравнение конвективной дисперсии и провести расчеты с помощью полученного решения
2. С помощью программы ATRANS, реализующей аналитическое решение Доменико (одномерная фильтрация и трехмерная дисперсия), провести серию расчетов соответствующих одномерной, двумерной и трехмерной миграции трассера.
3. Методом аналитических элементов (с помощью программы (GFLOW) рассчитать структуру потока подземных вод вблизи свали и мероприятия по перехвату загрязненного потока.
4. Методом конечных разностей (эйлеровский подход). С помощью предлагаемых программ (FD и TVD) рассчитать одномерную миграцию консервативного трассера от источника загрязнения при различных числах Пекле.
5. С помощью программ PMWIN- MT3DMS на основе эйлеровско-лагранжевых методов рассчитать миграцию загрязняющих веществ от хранилища для условий аналогичных занятию 2. Провести сопоставление с результатами полученными аналитическими методами.
6. Используя пакет PMWIN и программы MODFLOW-MT3DMS провести расчеты миграции к водозаборной скважине с территории свалки. Для расчета адвекции использовать метод характеристик
7. Используя код Feflow провести расчет миграции со свалки к водозаборной скважине расположенной у реки. Условия задачи аналогичны занятию 6.
8. Используя код GeRa провести расчет миграции со свалки к водозаборной скважине расположенной у реки. Условия задачи аналогичны занятию 6.
9. Решение задач фильтрации переменной плотности
10. Расчеты двумерной миграции загрязняющих веществ через зону аэрации с помощью кода VS2D

## **Рекомендуемые образовательные технологии**

Учебный материал подается с использованием современных средств визуализации и анимированных презентаций.

В процессе проведения семинарских лабораторных занятий применяются методы развивающего обучения в интерактивной форме. На лабораторных занятиях студенты самостоятельно, под контролем преподавателя осваивают лабораторные методы определения водно-коллекторских свойств горных пород и гидрогеохимического анализа воды, проводят гидрогеологические расчеты. Лабораторные занятия проводятся в специализированной лаборатории моделирования, оборудованной компьютерами с установленным лицензионным программным обеспечением для геофильтрационного моделирования по группам (подгруппам), численностью не более 10-12 чел.

Самостоятельная работа студентов заключается в проработке отдельных разделов курса, выполнение моделирования задач, начатых на лабораторных занятиях и составлении пояснительной записки к ним при дистанционном сопровождении (консультациях) преподавателя.

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

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

Текущий контроль усвоения дисциплины осуществляется при сдаче каждым студентом выполненных лабораторных работ по моделированию миграции.



Для текущего контроля студентов в ходе семестра проводятся устные опросы.

### **Примерный перечень вопросов для проведения текущего контроля/ Темы**

1. Написать дифференциальные уравнения геофильтрации для одномерного, планового, профильного, планово-пространственного и пространственного потоков (одного из) и объяснить входящие в него параметры.
2. Конвекция. Гидродинамическая дисперсия. Молекулярная диффузия. Механическая дисперсия. Продольная и поперечная дисперсивности.
3. Сорбция. Коэффициент сорбционного распределения. Фактор замедления. Распад. Теплоперенос. Теплопроводность.
4. Уравнения конвективно-дисперсионного тепло-массопереноса.
5. Граничные условия. Оценка времени миграции загрязнения через зону аэрации.
6. Аналитические методы решения задач геомиграции. Математическая постановка. Методы решения.
7. Решение задачи: многомерной дисперсия в одномерном потоке с учетом равновесной сорбции и распада.
8. Методы расчета траекторий на основе скоростей фильтрации полученных из аналитических и численных моделей
9. Конечно-разностное представление уравнения конвективно-дисперсионного переноса. Сеточные числа Пекле и Куранта.
10. Эйлоровские методы решения конвективно-дисперсионного переноса. Аппроксимация конвективного переноса. Центральные разности. Направленные разности. Аппроксимация временной производной. Явная схема. Неявная схема
11. Численная дисперсия. Метод TVD.
12. Основные положения Эйлоровско-Лагранжевых методов(методов характеристик). Расщепление по физическим процессам.
13. Методы решения конвективного переноса частиц. Методы Рунге-Кутты. Методы решения уравнения дисперсии.
14. Принципы аппроксимации пространственной части уравнения конвективной дисперсии методом конечных элементов.
15. Принципы аппроксимации уравнения конвективной дисперсии методом конечных объемов.
16. Уравнения фильтрации и теплопереноса описывающие плотностную конвекцию.

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

1. Решить методом разделения переменных одномерное стационарное уравнение конвективной дисперсии и провести расчеты с помощью полученного решения
2. С помощью программы ATRANS, реализующей аналитическое решение Доменико (одномерная фильтрация и трехмерная дисперсия), провести серию расчетов соответствующих одномерной, двумерной и трехмерной миграции трассера.
3. Методом аналитических элементов (с помощью программы (GFLOW) рассчитать структуру потока подземных вод вблизи свали и мероприятия по перехвату загрязненного потока.
4. Методом конечных разностей(эйлеровский подход).С помощью предлагаемых программ (FD и TVD) рассчитать одномерную миграцию консервативного трассера от источника загрязнения при различных числах Пекле.
5. С помощью программ PMWIN- MT3DMS на основе эйлоровско-лагранжевых методов рассчитать миграцию загрязняющих веществ от хранилища для условий

аналогичных занятию 2 . Провести сопоставление с результатами полученными аналитическими методами.

6. Используя пакет PMWIN и программы MODFLOW-MT3DMS провести расчеты миграции к водозаборной скважине с территории свалки. Для расчета адвекции использовать метод характеристик

7. Используя код Feflow провести расчет миграции со свалки к водозаборной скважине расположенной у реки. Условия задачи аналогичны занятию 6 .

8. Используя код GeRa провести расчет миграции со свалки к водозаборной скважине расположенной у реки. Условия задачи аналогичны занятию 6 .

9. . Решение задач фильтрации переменной плотности

10. Расчеты двумерной миграции загрязняющих веществ через зону аэрации с помощью кода VS2D

**Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации:**

**Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине.**

Результаты обучения	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания: Модели геомиграции, аналитические, численно-аналитические, основные численные методы (МКР,МКЭ,МКО) геомиграционного моделирования.	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания
Умения: решать с помощью методов моделирования практически важные задачи прогнозирования миграции загрязняющих веществ от источников загрязнения	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает неточности непринципального характера	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умения проводить геомиграционную и вычислительную схематизацию и геомиграционное моделирование	Успешное умение проводить геомиграционную и вычислительную схематизацию и геомиграционное моделирование, расчеты мероприятий по реабилитации загрязненных водоносных горизонтов
Владения: навыками создания численных геомиграционных	Навыки владения отсутствуют	Фрагментарное владение методикой	В целом сформированные навыки владения	Владение современным терминологиче

<p>моделей при помощи специализированных программных пакетов моделирования геомиграции. (программы PMWIM, FEFLOW, GeRa)</p>		<p>геомиграционного моделирования с использованием прикладных пакетов программ моделирования геомиграции</p>	<p>методикой геомиграционного моделирования с использованием прикладных пакетов программ моделирования геомиграции</p>	<p>ским аппаратом моделирования, методикой геомиграционной и вычислительной схематизации и построения моделей. Умение решать при помощи геомиграционного моделирования прикладные задачи</p>
---	--	--	--	--

## 8. Ресурсное обеспечение:

### А) Перечень основной и дополнительной литературы.

#### а) основная литература:

1. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика. М., Изд-во КДУ, 2010. – 500 с.
2. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод., М., Недра, 1986. – 208с.
3. Kinzelbach.V. Groundwater modeling: an introduction with sample programs in BASIC, Amsterdam, Elsevier,. 1986. – 333с.
4. Chunmiao Zheng, Gordon D. Bennett, Applied Contaminant Transport Modeling, 2nd Edition, WILEY INTERSCIENCE, 2002, 656 Pages
5. H.G. Diersch FEFLOW.Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014,p.996

#### б) дополнительная литература:

- 1 Василевский Ю.В, Капырин И.В. Практикум по современным вычислительным технологиям и основам математического моделирования. М.: МАКС Пресс, 2009.
- 2 Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. С-П., Изд-во НАУКА, 2011. – 1158с
- 3 Chiang WH and Kinzelbach W, 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. First Edition. Springer Berlin Heidelberg New York. 2001, ISBN 3-540 67744-5, 346 pp
- 4 Patrick A. Domenico, Franklin W. Schwartz, Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd Edition, WILEY INTERSCIENCE, 2002, 656 Pages

Б) Перечень лицензионного программного обеспечения пакеты программ Microsoft Office Excel, Microsoft Office Word, Microsoft Office PowerPoint, Processing Modflow 8, ATRANS, GFLOW, FEFLOW, GeRa, VS2D

В) Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем нет

Г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (лицензионное программное обеспечение не требуется):

Д) Материально-технического обеспечение:

а) помещения – аудитория, рассчитанная на группу из 15 учащихся; 1 лаборатория геофильтрационного моделирования с сетью персональных компьютеров.

б) оборудование:

аудитория: мультимедийный проектор, компьютер, экран, выход в Интернет;

лаборатория геофильтрационного моделирования – компьютерный класс с установленным лицензионным программным обеспечением для моделирования

9. Язык преподавания – русский.

10. Преподаватель (преподаватели) – Расторгуев А.В.

11. Автор (авторы) программы – Расторгуев А.В.