

Учебник посвящён основам теории геофизических методов, применяемых для изучения глубинного строения Земли, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, решения задач малоглубинной геофизики.

Рассматривается математический аппарат теории геофизических полей: алгебра физических величин, дифференцирование и интегрирование физических полей, криволинейные координатные системы. Исследуются возбудители, уравнения и потенциалы поля, вопросы графического изображения полей, модели безвихревого и вихревого полей. Анализируются электромагнитное поле в вакууме и веществе, уравнения электромагнитного поля и его потенциалов, модели электромагнитного поля.

ТЕОРИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ



М. Н. Бердичевский, В. И. Дмитриев,
А. А. Булычев, П. Ю. Пушкарев

ТЕОРИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

КЛАССИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТСКИЙ
УЧЕБНИК



Издательство
Московского
университета

ISBN 978-5-19-011929-9



9 785190 119299





МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА



**КЛАССИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТСКИЙ
УЧЕБНИК**

Серия основана в 2002 г.



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
Геологический факультет

М. Н. Бердичевский, В. И. Дмитриев,
А. А. Булычев, П. Ю. Пушкарев

ТЕОРИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Учебник

УДК 550.8.015(075.8)
ББК 26.21я73
Т33

Печатается в соответствии с издательской программой,
посвящённой 270-летию Московского университета

Рецензенты:

Шевнин Владимир Алексеевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Персова Марина Геннадьевна — доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики Факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета

Теория геофизических полей : учебник / М. Н. Бердичевский,
Т33 В. И. Дмитриев, А. А. Булычев, П. Ю. Пушкарев. — Москва : Изда-
тельство Московского университета, 2024. — iv, 194, [2] с. : ил. —
(Классический университетский учебник).

ISBN 978-5-19-011929-9

Учебник посвящён основам теории геофизических методов, применяемых для изучения глубинного строения Земли, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, решения задач малоглубинной геофизики.

Рассматривается математический аппарат теории геофизических полей: алгебра физических величин, дифференцирование и интегрирование физических полей, криволинейные координатные системы. Исследуются возбудители, уравнения и потенциалы поля, вопросы графического изображения полей, модели безвихревого и вихревого полей. Анализируются электромагнитное поле в вакууме и веществе, уравнения электромагнитного поля и его потенциалов, модели электромагнитного поля.

Учебник предназначен для студентов вузов, обучающихся по геофизическим специальностям. Он может быть полезен аспирантам, преподавателям, научным сотрудникам и инженерам, работающим в области геофизики.

УДК 550.8.015(075.8)
ББК 26.21я73

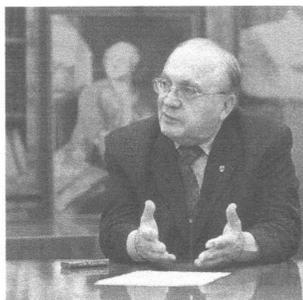
© Бердичевский М. Н., наследник; Дмитриев В. И., наследник;
Булычев А. А.; Пушкарев П. Ю., 2024

© Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2024

© Оформление. Издательство Московского университета, 2024

ISBN 978-5-19-011929-9

В 2025 году Московскому университету — старейшему университету России — исполняется 270 лет. За без малого три века он выучил, вырастил и выпустил в жизнь огромную плеяду выдающихся ученых и педагогов. Люди Московского университета сформировали всемирно признанные научные школы, разработали эффективные методики преподавания разных дисциплин, внеся тем самым весомый вклад в успешное научно-технологическое и духовно-нравственное развитие нашей страны. Многие из них создали замечательные книги, в которых ярко отражены как научные и педагогические достижения, так и история самого университета.



Готовясь к юбилею, мы издаем и переиздаем книги, которые дают наилучшее представление об интеллектуальном богатстве Московского университета, о его вкладе в науку и образование. Издательские серии «Классический университетский учебник», «Труды выдающихся ученых МГУ», «История Московского университета», «Из сокровищницы Московского университета» включают ставшие классикой учебники, на которых выросло не одно поколение студентов, фундаментальные научные монографии, книги, повествующие об истории и современности старейшего и крупнейшего университета России.

Посвящая этот издательский проект 270-летию нашей Альма-матер, мы надеемся привлечь внимание читателей к достижениям университетских ученых в разных областях знания, к многогранному научно-образовательному наследию Московского университета, чья книжная сокровищница продолжает пополняться фундаментальными трудами, становясь к юбилею еще богаче.

Ректор Московского университета
академик

В. А. Садовничий

A handwritten signature in black ink, reading 'В. А. Садовничий'. The signature is written in a cursive style with some flourishes.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лекция I. Введение	3
РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	
Лекция II. Алгебра физических величин	7
Лекция III. Дифференцирование физических полей	25
Лекция IV. Интегрирование физических полей	37
Лекция V. Криволинейные координатные системы	45
РАЗДЕЛ 2. ФИЗИЧЕСКОЕ ПОЛЕ	
Лекция VI. Возбудители поля	56
Лекция VII. Уравнения поля	64
Лекция VIII. Потенциалы векторного поля	74
Лекция IX. Графическое изображение полей	84
Лекция X. Модели безвихревого поля	92
Лекция XI. Модели вихревого поля	115
РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ	
Лекция XII. Электромагнитное поле в вакууме	129
Лекция XIII. Электромагнитное поле в веществе	142
Лекция XIV. Потенциалы электромагнитного поля	159
Лекция XV. Модели электромагнитного поля	172
Список литературы	194

ЛЕКЦИЯ I. ВВЕДЕНИЕ

Геофизика изучает внутреннее строение, свойства Земли и происходящие в ней процессы с помощью геофизических полей. Таким образом, теория геофизических полей является основным, фундаментальным курсом образовательной программы геофизиков.

Курс теории геофизических полей призван заполнить пробел между курсами по высшей математике, отличающимися существенным уровнем абстракции, и курсами по методам разведочной геофизики, описывающими их применение для решения конкретных задач. Данный курс насыщен формулами, но авторам хотелось бы, чтобы читатели видели в них выражение понимания физического мира, возникшего в результате самоотверженной работы и гениальных открытий многих выдающихся ученых.

Под полем мы будем понимать некоторую физическую величину, определенную во всех точках пространства. Поле может быть скалярным, векторным и тензорным. Кроме того, будем рассматривать поля стационарные, то есть постоянные во времени, и нестационарные, или переменные.

К геофизическим полям мы будем относить: стационарные гравитационное, магнитное и электрическое поля, переменные электромагнитное, тепловое и поле упругих колебаний.

Геофизическое поле существует, если у него есть возбудители. Например, в гравиразведке изучается поле, создаваемое массами, а в магниторазведке — намагниченными горными породами. При этом модель среды представляет из себя соответственно распределение плотности и намагниченности. А, например, изучаемые в электроразведке и сейсморазведке распределения электрических свойств и скоростей упругих волн сами по себе полей не создают, они возникают из-за сторонних возбудителей. В общем случае можно сказать, что для вычисления поля необходимо задать модель его возбудителей и (или) модель среды. Это вычисление носит название прямой задачи геофизики.

Прямые задачи имеют важнейшее значение в теории геофизических методов. Они позволяют исследовать чувствительность этих методов, а также лежат в основе решения обратных задач геофизики, то есть определения свойств среды по известным геофизическим полям. В курсе теории геофизических полей мы рассмотрим целый ряд прямых задач для простых базовых моделей, а также некоторые принципы решения прямых задач для моделей более сложных.

В данном курсе мы будем абстрагироваться от строения вещества на микроуровне (атомов и молекул) и рассматривать макроскопическую модель поля, существующего в сплошной среде, свойства которой характеризуются усредненными параметрами. Эта модель охватывает все упомянутые выше геофизические поля (искусственного и естественного происхождения), используемые в различных методах малоглубинной и глубинной геофизики. Главное внимание в курсе уделяется физической сущности наблюдаемых явлений и их достаточно строгому математическому описанию.

Книга состоит из трех разделов.

Раздел 1 «Математические основы» (лекции II–V). Этот раздел является введением в теорию геофизических полей. Он напоминает студентам основные понятия векторной и тензорной алгебры и векторного и тензорного анализа в объеме, достаточном для изучения скалярных, векторных и тензорных величин, переменных в пространстве и времени.

Раздел 2 «Физическое поле» (лекции VI–XI). В этом разделе устанавливается двоякая природа возбудителей физического поля (источников и вихрей) и анализируется структура поля источников и поля вихрей. Выводится скалярное и векторное уравнение Пуассона для этих полей и решается задача о поле источников и вихрей, распределенных в безграничной однородной среде. Вводятся скалярный потенциал поля источников и векторный потенциал поля вихрей, рассматриваются способы графического изображения этих полей, строятся элементарные модели поля источников (точечных, линейных, поверхностных, объемных) и поля вихрей (линейных, поверхностных и объемных), определяются условия эквивалентности полей источников и вихрей.

Раздел 3 «Электромагнитное поле» (лекции XII–XV). Этот раздел конкретизирует представление о реальном геофизическом поле на электромагнитном примере. Показывается, каким образом Максвеллу удалось обобщить эмпирические законы, основанные на опытах Кулона, Био, Савара, Фарадея и других ученых, и облечь их в строгую математическую форму, получившую название уравнений Максвелла. Выводится система уравнений Максвелла для электромагнитного поля в сплошной среде, определяются источники и вихри электромагнитного поля, вводятся скалярный и векторный электродинамические потенциалы, решается задача о поле электрических и магнитных источников и вихрей, распределенных в безграничной однородной среде. В заключение рассматриваются элементарные модели электромагнитного поля: электрический и магнитный диполи, сферическая и плоская волны, горизонтально-слоистая магнитотеллурическая модель Тихонова — Каньяра.

Из-за ограниченного объема курса мы не можем подробно рассмотреть все геофизические поля и ограничиваемся примером электромагнитного (ЭМ) поля, которое является самым сложным и многообразным из используемых в геофизике. Уравнения других физических полей совпадают с частными случаями уравнений ЭМ поля, как видно из следующей таблицы.

Физические поля, используемые в разных методах геофизики

Метод		Поле	Уравнения
Гравиразведка		Гравитационное	Пуассона
Магниторазведка		Магнитостатическое	Пуассона
Электро- разведка	Методом ЕП	Электростатическое	Пуассона
	Постоянным током	Стационарное ЭМ	Пуассона
	Низкочастотная	Квазистационарное ЭМ	Теплопроводности
	Высокочастотная	Волновое ЭМ	Волновое
Терморазведка		Температурное	Теплопроводности
Сейсморазведка		Упругих колебаний	Волновое

Эта книга представляет собой конспект лекций по курсу теории геофизических полей, который читается для студентов-геофизиков геологического факультета МГУ с 1972 года. Курс был разработан профессорами Владимиром Ивановичем Дмитриевым и Марком Наумовичем Бердичевским. Вначале все лекции читал М. Н. Бердичевский, затем лекции II–V стал читать ассистент, а в дальнейшем профессор и заведующий кафедрой Андрей Александрович Булычев. Сейчас он читает лекции I–X, а лекции XI–XV читает профессор Павел Юрьевич Пушкарев. Содержание курса менялось в соответствии с развитием геофизических методов, его объем несколько уменьшился, но примерный план и стиль изложения материала в основном сохранились.

Книга написана в стиле учебника и не содержит ссылок на литературу. Однако в конце приведен список литературы, которую можно использовать для более углубленного изучения теории геофизических полей. Основная литература включает учебники по близким по содержанию курсам, читаемым или читавшимся в вузах Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Киева, Новосибирска и других городов. Дополнительная литература включает книги по смежным разделам науки, которых наш курс касается частично.