

А. М. Капитонов
В. Г. Васильев

А. М. Капитонов
В. Г. Васильев

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Монография

Институт горного дела, геологии и геотехнологий



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сибирский федеральный университет

А. М. Капитонов, В. Г. Васильев

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ГОРНЫХ ПОРОД
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Монография

Красноярск
СФУ
2011

УДК 622.02
ББК 26.304
К20

Рецензенты: В. И. Вальчак, канд. геол.-минералог. наук, гл. геолог
ОАО «Енисейгеофизика»;

Э. Н. Линд, канд. геол.-минералог. наук, зав. отд. прикладной гео-
физики ГППК «КНИИГиМС», ст. науч. сотр.

Капитонов, А. М.

К20 Физические свойства горных пород западной части Сибирской
платформы : монография / А. М. Капитонов, В. Г. Васильев. – Крас-
ноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 424 с.
ISBN 978-5-7638-2142-0

Изложены методологические принципы изучения плотностных, электри-
ческих, магнитных, упругих и акустических свойств горных пород, разработана
теория предельных значений физических параметров горных пород. Это, по су-
ти, первая крупная попытка систематизировать в одной работе физические свой-
ства магматических и осадочных пород, в том числе и рифейских, с которыми
связаны нефтегазоносные зоны Сибирской платформы. Приведены данные по
расчленению и корреляции интрузий. Представлены петрофизические модели
скважин Юрубченской площади и Бахтинского мегавыступа, которые сравни-
ваются с данными ГИС. Приведены результаты методических исследований
акустических свойств горных пород. Установлены метрологические критерии
определения скоростей распространения упругих волн в образцах горных пород.

Монография представляет интерес для широкого круга геологов, геофи-
зиков, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов геологиче-
ского и геофизического профиля.

**УДК 622.02
ББК 26.304**

ISBN 978-5-7638-2142-0

© Сибирский федеральный
университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 7 |
| Глава 1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ..... | 13 |
| 1.1. Иерархия геологических объектов..... | 13 |
| 1.2. Элемент, элементарная ячейка, структура..... | 15 |
| 1.3. Надструктурные элементы..... | 20 |
| 1.4. Два вида гетерогенности горных пород..... | 22 |
| Глава 2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД..... | 23 |
| 2.1. Механические состояния горных пород..... | 23 |
| 2.2. Механическая диаграмма горных пород..... | 25 |
| 2.3. Показатели прочностных свойств горных пород..... | 28 |
| 2.4. Упругие свойства минералов..... | 29 |
| 2.4.1. Упругие показатели минералов..... | 29 |
| 2.4.2. Упругая анизотропия минералов..... | 32 |
| 2.4.3. Упругие постоянные минералов..... | 34 |
| 2.5. Упругие свойства и упругие показатели горных пород..... | 36 |
| 2.5.1. Упругие показатели..... | 36 |
| 2.5.2. Экспериментальные значения упругих постоянных горных пород..... | 39 |
| 2.5.3. Влияние структурных дефектов (поры и микротрещины) на упругие модули горных пород... | 44 |
| 2.6. Твердость горных пород и связь с упругими характеристиками..... | 47 |
| Глава 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН В МИНЕРАЛАХ И ГОРНЫХ ПОРОДАХ..... | 53 |
| 3.1. Распространение упругих волн в минералах..... | 53 |
| 3.1.1. Кубические минералы..... | 56 |
| 3.1.2. Гексагональные минералы..... | 57 |
| 3.2. Распространение упругих волн в горных породах..... | 58 |
| 3.2.1. Структурно-вещественная характеристика горных пород..... | 59 |
| 3.2.2. Механические модели однородных и неоднородных горных пород..... | 60 |
| 3.3. Распространение упругих волн в однородных горных породах..... | 61 |
| 3.4. Распространение упругих волн в неоднородных горных породах..... | 62 |

| | |
|--|-----|
| 3.4.1. Распространение упругих волн в воздушносухих пористых горных породах..... | 63 |
| 3.4.2. Распространение упругих волн в водонасыщенных горных породах..... | 65 |
| 3.4.3. Зависимость скорости распространения упругих волн в горных породах от коэффициента пористости (теория) | 72 |
| 3.4.4. Зависимость скорости распространения упругих волн в горных породах от коэффициента пористости..... | 74 |
| Глава 4. РАСЧЕТ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ ОДНОФАЗНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД..... | 81 |
| 4.1. Метод Фойгта – Реусса..... | 83 |
| 4.2. Метод Хашина – Штрикмана..... | 86 |
| 4.3. Метод Мидду, Паула и Базу..... | 88 |
| 4.4. Сравнение рассчитанных упругих модулей с экспериментом..... | 91 |
| Глава 5. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД..... | 103 |
| 5.1. Плотность горных пород..... | 103 |
| 5.1.1. Предельное значение плотности горных пород..... | 103 |
| 5.1.2. Плотность горной породы с дефектами..... | 105 |
| 5.2. Магнитная восприимчивость доломитов..... | 108 |
| 5.2.1. Магнитная восприимчивость доломитов Юрубченской площади..... | 108 |
| 5.2.2. Использование магнитной восприимчивости для определения чистоты доломитов..... | 113 |
| 5.3. Предельные значения упругих характеристик горных пород..... | 116 |
| 5.3.1. Кубические кристаллы. Галит..... | 118 |
| 5.3.2. Предельные упругие характеристики кальцита..... | 126 |
| 5.3.3. Предельные значения упругих характеристик и скоростей распространения упругих волн в доломите..... | 132 |
| 5.3.4. Упругие постоянные доломитов Юрубченской площади..... | 152 |
| 5.3.5. Статистические характеристики физических свойств доломитов рифея..... | 154 |
| 5.3.6. Сравнение экспериментальных значений скоростных характеристик доломитов рифея Юрубченской площади..... | 159 |
| 5.3.7. Сравнение экспериментальных значений скоростных характеристик доломитов Бахтинского мегавыступа с предельными значениями..... | 161 |
| 5.3.8. Предельные значения скоростей распространения упругих волн в песчаниках и алевролитах..... | 164 |

| | |
|---|-----|
| Глава 6. УПРУГИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОФАЗНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД..... | 173 |
| 6.1. Представление результатов исследований физических свойств..... | 173 |
| 6.2. Плотность двухфазных горных пород..... | 177 |
| 6.3. Расчет упругих характеристик двухфазных горных пород.... | 178 |
| 6.3.1. Теория расчета упругих характеристик двухфазных горных пород..... | 179 |
| 6.3.2. Результаты численного моделирования..... | 187 |
| 6.4. Влияние аргиллитовой фазы на упругие свойства доломитов | 191 |
| 6.4.1. Расчет упругих характеристик системы доломит – аргиллит..... | 192 |
| 6.4.2. Скорости распространения упругих волн в горных породах системы доломит – аргиллит..... | 196 |
| 6.4.3. Сравнение рассчитанных и экспериментальных скоростных характеристик доломитов..... | 199 |
| 6.5. Петрофизические свойства долеритов..... | 204 |
| 6.5.1. Предельное значение плотности долеритов.... | 204 |
| 6.5.2. Предельное значение упругих постоянных долеритов | 206 |
| Глава 7. УПРУГИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД С КОМПОЗИЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ..... | 213 |
| 7.1. Структурная и петрофизическая системы координат..... | 214 |
| 7.2. Упругие характеристики слоистых горных пород системы доломит–аргиллит..... | 216 |
| 7.3. Упругие характеристики слоистых горных пород системы доломит–кварцевый алевролит..... | 225 |
| 7.4. Анизотропия горных пород, вскрытых скв. 36 Юрубченской площади..... | 230 |
| 7.5. Особенности распространения поперечных упругих волн в слоистых средах..... | 238 |
| 7.6. Анизотропия скоростей упругих волн в доломитах, вскрытых скважиной 50 Юрубченской площади..... | 238 |
| 7.7. Анизотропия скоростей распространения упругих волн в доломитах, вскрытых скважиной 28 Юрубченской площади..... | 243 |
| 7.8. Анизотропия скоростей распространения упругих волн в доломитах, вскрытых скважиной 100 Юрубченской площади | 245 |
| 7.9. Анизотропия скоростей распространения упругих волн в доломитах, вскрытых скважиной 3 Кочумдекской площади | 247 |
| 7.9.1. Общая характеристика исследованных горных пород..... | 247 |
| 7.9.2. Слоистые доломиты..... | 248 |
| 7.9.3. Доломиты с высокой анизотропией и изменение анизотропии акустических свойств горных пород по разрезу скважины..... | 253 |

| | |
|--|-----|
| Глава 8. ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ГИС..... | 262 |
| 8.1. Кочумдекская площадь..... | 262 |
| 8.1.1. Петрофизическая модель разреза, интервал 3159–3195 м | 263 |
| 8.1.2. Петрофизическая модель фундамента..... | 264 |
| 8.1.3. Доломиты..... | 265 |
| 8.1.4. Доломиты аргиллитистые..... | 267 |
| 8.1.5. Пластовые скорости толщ доломитов костинской и платоновской свит кембрия..... | 270 |
| 8.2. Магматический комплекс..... | 270 |
| 8.2.1. Физические свойства долеритов Ванаварской площади..... | 271 |
| 8.2.2. Физические свойства долеритов Холминской площади..... | 297 |
| 8.2.3. Физические свойства долеритов Ясенгской площади | 302 |
| 8.3. Физические свойства горных пород Северной площади..... | 304 |
| 8.3.1. Терригенные породы..... | 305 |
| 8.3.2. Сравнение петрофизической модели с данными ГИС | 310 |
| 8.4. Бурусская площадь..... | 314 |
| 8.5. Таначинская площадь..... | 316 |
| 8.6. Пойменная площадь..... | 320 |
| 8.7. Петрофизические исследования для уточнения литологического описания и структурных особенностей горных пород..... | 327 |
| Глава 9. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И МЕТОДИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 343 |
| 9.1. Общая характеристика методов определения упругих характеристик горных пород..... | 344 |
| 9.2. Статические и динамические упругие характеристики горных пород..... | 347 |
| 9.3. Результаты внешнего контроля..... | 350 |
| 9.4. Методы бегущих волн (импульсные методы)..... | 352 |
| 9.4.1. Изменение формы акустического сигнала при ударном возбуждении..... | 352 |
| 9.4.2. Импульсно-фазовый метод..... | 360 |
| 9.5. Сравнение результатов измерений разными методами для модельного образца..... | 363 |
| 9.6. Изменение скоростей упругих волн от давления..... | 364 |
| 9.7. Влияние водонасыщения на скорости упругих волн..... | 368 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 370 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 378 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. К главе 5..... | 390 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. К главе 6..... | 400 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3. К главе 8..... | 406 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4. К главе 9..... | 418 |

ВВЕДЕНИЕ

В комплексном изучении геологического строения западной части Сибирской платформы наряду с геологическими и геофизическими методами поисков и разведки серьезное значение придается лабораторному изучению физических свойств горных пород. Как известно, результаты лабораторных исследований физических свойств горных пород служат для более обоснованного проектирования полевых и промыслово-геофизических работ, повышения качества интерпретации результатов геофизических работ, разработки методов количественной оценки коллекторских свойств пластов по данным геофизических исследований в скважинах, а также решения ряда общих геологических вопросов, связанных с условиями осадконакопления, динамометаморфизма и некоторыми другими.

Систематическим изучением физических свойств горных пород западной части Сибирской платформы ПГО „Енисейнефтегазгеофизика” начало заниматься с 1978 г. Для выполнения петрофизических исследований ПГО „Енисейнефтегазгеофизика” на хоздоговорной основе в Красноярском институте цветных металлов создало лабораторию физических свойств горных пород (заведующий кафедрой физики А. М. Капитонов), ее основной задачей было изучение физических свойств горных пород верхней части разреза, включая интрузивный комплекс и рифейские отложения. Исследования были направлены на обеспечение сейсморазведки и данных ГИС. С 1983 НПО „Енисейнефтегазгеофизика” совместно с Красноярским государственным университетом создали лабораторию (тематическая партия КРАСОЭМ и физический факультет КГУ) для комплексного изучения физических параметров горных пород западной части Сибирской платформы (А. М. Капитонов).

С 1984 по 1987 г. изучение физических свойств горных пород западной части Сибирской платформы проводила также лаборатория физики горных пород кафедры теоретической физики Красноярского педагогического института (под руководством профессора А. Я. Власова и А. М. Капитонова).

С 1988 г. в Красноярском крае прекратились систематические комплексные петрофизические исследования, направленные на обеспечение сейсморазведки, сейсмокаротажа и акустического каротажа. В Красноярске осталась единственная профильная лаборатория по изучению физических свойств горных пород. Это лаборатория физики пласта ПГО „Енисейнефтегазгеология”, которая выполняла комплексное изучение физических свойств горных пород коллекторов.

В 1991 г. по заказу Богучанской геофизической экспедиции лаборатория физических свойств горных пород НПО „Сибцветметавтоматика”, ВНИИ „Геоцветмет” выполнили исследования физических свойств рифейских отложений (А.М. Капитонов, П. П. Скоробогатых. Отчёт по теме № 0-1127, 1991 „Изучить физические свойства горных пород венд-рифейского возраста Сибирской платформы”).

За период исследований был накоплен большой фактический материал по изучению физических параметров пород на образцах, отобранных из параметрических, разведочных и колонковых скважин, который не только не был обобщен, но даже не систематизирован.

Материалы петрофизических исследований горных пород западной части Сибирской платформы были частично систематизированы в 2009–2010 г. и приведены в банке данных „Петрофизические свойства ваенд-рифейских отложений Юрубченского месторождения Сибирской платформы”, СФУ, 2009 (авторы А. М. Капитонов, В. Г. Васильев) и банке данных „Физические свойства горных пород Бахтинского межавыступа Сибирской платформы”. СФУ, 2010 (авторы А. М. Капитонов, В. Г. Васильев).

Авторы понимали, что более такого объемного бурения на Сибирской платформе уже не будет, поэтому была поставлена задача обобщения всех имеющихся лабораторных материалов по физическим свойствам горных пород западной части Сибирской платформы. Полученные экспериментальные результаты с помощью современных методологических принципов удалось осмыслить по-новому и использовать их в геологической практике.

Авторы исходили из методологического принципа предельных физических параметров среды. Такой подход позволил разделить вклад вещественной и структурной составляющих в физические характеристики горных пород. Как известно, лабораторные исследования относятся к этапу самого детального изучения физических свойств геологического объекта. Только на этом уровне иерархии комплексного изучения физических свойств геологической материи можно установить структурные особенности горной породы. Такие, как природу анизотропии, наличие аморфной фазы, цементированность, величину и природу пористости, физико-механическую модель горной породы, отражающей ее вещественно-структурные признаки и т. д.

При написании настоящей монографии можно было бы пойти традиционным путем, когда результаты исследований представляют в виде обобщенных таблиц, как это сделано, например, в монографии Н. А. Туезовой [Физические свойства горных пород Западно-Сибирской низменности. М.: Недра, 1964]. Авторы исходили из того, что каждый образец по своим вещественно-структурным признакам отражает индивидуальность физических свойств самого геологического пласта, поэтому он рассматри-

вался как геологический объект определенного иерархического уровня. Такой подход к исследованиям физических свойств горных пород позволяет адекватно осуществить переход от петрофизической модели, которая создается по данным лабораторных исследований, к геофизической, а далее и геологической модели.

В настоящей монографии представлены результаты следующих свойств горных пород: вещественный состав по карбонатному анализу, магнитная восприимчивость, намагниченность, плотность, открытая пористость, полная пористость, скорость распространения продольных и поперечных упругих волн, параметры анизотропии скоростей распространения упругих волн, упругие характеристики, прочность и электрическое сопротивление. При построении скоростных разрезов некоторых скважин использованы результаты анализа акустического каротажа и сейсмокаротажа.

Здесь приведены результаты теоретических расчетов упругих постоянных и плотности горных пород, что позволило рассчитать предельные скорости распространения упругих волн в горных породах определенного состава.

Основной задачей изучения физических свойств горных пород было обоснование данных ГИС, что и определило требования к отбору керна по скважинам: детальность по разрезу и полное отражение литологических разностей геологического разреза. Это требовало отбора большого количества образцов и массовых измерений физических свойств горных пород.

Основной подход к изучению физических свойств горных пород основывался на структурно-вещественной иерархии. Рассмотрено влияние структуры на физические свойства горных пород. Геологи под структурой породы имеют в виду морфологические особенности ее структурных элементов – зерен минералов. Здесь под термином “структура” понимается обобщенная характеристика породы, включающая как внутреннее строение горной породы, так и степень связанности ее структурных элементов – зерен минералов. Породы с идеальной связью структурных элементов – это идеальные упругие среды, упругие постоянные которых характеризуют величину взаимодействия между структурными элементами. Для идеальных поликристаллов связь между зернами осуществляется на уровне химических связей. Для монокристаллических минералов в этом случае имеют в виду решеточные упругие постоянные, которые определяют связь между их структурными элементами – атомами, молекулами, группой атомов.

Для горных пород их генезис определяет степень связанности структурных элементов. Таким образом, происхождение горных пород будет влиять на акустические свойства горных пород. В теории и практике механического поведения горных пород используют понятие „цементация пород”. Для осадочных пород, как известно, тип цемента в основном и определяет их физико-механические свойства. Морфологические особенно-

сти структуры слабо влияют на упругие свойства горных пород, а значит, и скорости распространения в них упругих волн. Основным фактором влияния становится структурная характеристика породы – степень связанности ее структурных элементов.

Монография состоит из введения, девяти глав и выводов.

В главе 1 изложены методологические принципы изучения физических свойств горных пород как сред со сложной внутренней структурой. Изучение физических свойств геологических объектов представляет собой многоуровневый характер и основывается на системном подходе, требующем выделения структурных уровней системы. В основу иерархического разделения геологических объектов положены вещественно-структурные признаки.

В главе 2 излагается методология изучения физико-механических свойств минералов и горных пород, определены виды механических состояний природных материалов, установлена иерархия численных значений физико-механических характеристик горных пород. Особое внимание уделено изучению упругих свойств минералов и горных пород. Наиболее сложный процесс деформирования протекает в горных породах, имеющих структурные дефекты, – поры и микротрещины, и особенно в коллекторах. Наличие структурных дефектов осложняет определение упругих характеристик, т. к. внешнее воздействие изменяет внутреннюю структуру пористой горной породы. Поэтому начальный участок деформационной кривой, которая определяется в реальном эксперименте, становится нелинейным, и упругая область существует при весьма малых деформациях, что служит причиной различия статических и динамических упругих постоянных горных пород. Горные породы рассматриваются как гетерогенные среды, физико-механическое проявление которых – неоднородные напряжения и деформации структурных элементов при внешнем воздействии. Степень гетерогенности однофазной горной породы поликристаллической среды контролируется упругой анизотропией зерен минерала.

В главе 3 рассмотрены закономерности распространения упругих волн в бесконечной однородной анизотропной среде (минералы), в однородных и неоднородных горных породах. Для горных пород выделены два порядка неоднородности: первый (для однофазных горных пород) обусловлен упругой анизотропией зерен минералов; второй (для многофазных горных пород, в том числе и пористых) обусловлен отличием упругих характеристик отдельных фаз. Гетерогенность горных пород приводит к тому, что они становятся средами, которые обладают дисперсией и затуханием. В изотропной среде с дисперсией и затуханием для гармонических волн распространяются продольная волна с фазовой скоростью и две поперечные волны с одинаковыми фазовыми скоростями, которые, в свою очередь, зависят от частоты возбуждающих волн.