



Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный
университет»

Земцов Н.С., Игумнов С.А., Бреднев И.И.

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

Учебно-методические указания к практическим занятиям и
самостоятельной работе по дисциплине «Физика горных пород»
для студентов специальности 130102 – "Технологии
геологической разведки"

Екатеринбург
2016

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
факультета геологии
и геофизики УГГУ
«__» _____ 2016 г.
Председатель комиссии

проф.

Земцов Н.С., Игумнов С.А., Бреднев И.И.

«Лабораторный практикум по Физике горных пород»
Методические указания к проведению практических работ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Физика
горных пород» для студентов специальности 130102 – "Технологии
геологической разведки"

Рецензент: _____ старший научный сотрудник
Института геофизики УрО РАН, доктор геолого-минералогических наук

Методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры геофизики
«__» _____ 2016 г. (протокол № __) и рекомендовано к изданию в
УГГУ.

Земцов Н.С., Игумнов С.А., Бреднев И.И.

355 *«Лабораторный практикум по Физике горных пород». Методические указания к проведению лабораторных работ: учебно-методическое пособие к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Физика горных пород» для студентов специальности 130102 "Технологии геологической разведки" / Н.С. Земцов, Игумнов С.А., Бреднев И.И. Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2016. – с.*

В учебно-методическом пособии кратко изложены теоретические основы и основные методы определения некоторых физических свойств горных пород. Рассмотрены основные приемы обработки результатов измерений физических свойств горных пород ручным способом и при помощи специализированных прикладных программ.

© Уральский государственный.
горный университет, 2016
© Земцов Н.С., Игумнов С.А.,
Бреднев И.И., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ:

ОГЛАВЛЕНИЕ:	3
1. Обработка результатов измерений	4
2. Лабораторная работа №1: Построение гистограммы распределения физического свойства по выборке	10
3. Лабораторная работа №3: Построение гистограммы распределения в программе «STATISTICA»	23
4. Лабораторная работа №4: Определение корреляционных зависимостей	28
5. Лабораторная работа №5: Построение петрофизической модели по результатам исследования керна	37
6. Лабораторная работа №6: Определение коэффициента нефтенасыщенности продуктивного пласта по данным метода сопротивлений.....	40
7. Лабораторная работа № 7: Измерение магнитной восприимчивости горных пород	44
8. Лабораторная работа № 8: Измерение удельного электрического сопротивления (УЭС) образцов горных пород.	48
9. Лабораторная работа № 9: Измерение плотности горных пород	52
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	61

1. Обработка результатов измерений

Любые измерения неизбежно сопровождаются погрешностями (ошибками).

При проведении измерений неизбежно возникают ошибки или погрешности.

По способу выражения погрешности принято делить на **абсолютные** и **относительные**. Абсолютные имеют размерность измеряемой величины, относительные измеряются в процентах.

По типу связи между погрешностью и измеряемой величиной различают постоянные, значение которых не зависит от самой измеряемой величины, и пропорциональные погрешности, значение которых пропорционально измеряемой величине. Пропорциональные погрешности становятся постоянными, если оценивать их в относительной шкале. Как правило, измерениям физических свойств, значения которых могут изменяться в широких пределах, присуще наличие пропорциональных погрешностей. При малом диапазоне значений погрешности можно считать постоянными.

В зависимости от характера причин их возникновения, погрешности разделяют на три группы: **систематические**, **случайные** и **грубые** (промахи).

Грубые ошибки возникают в результате факторов **из-за невнимательности оператора**, сбоев аппаратуры и т.д. Обычно результат измерений при этом сильно отличается от истинной величины и легко обнаруживается при внимательном просмотре.

Систематические погрешности являются следствием несовершенства метода измерений, неточной градуировки или настройки измерительной аппаратуры.

Знак и величина систематической погрешности остается постоянными. Систематические погрешности можно обнаружить путем внешнего контроля, т.е. при проведении измерений на другой, более точной аппаратуре.

Они остаются постоянными при выполнении серии измерений (в абсолютной или относительной шкале). В зависимости от знака погрешности результаты измерения могут систематически завышать либо занижать результаты измерений. Систематические погрешности исключают путем введения поправок, найденных экспериментально. Значения поправок можно определить путем проведения измерений на стандартных образцах либо сопоставлением с результатами контрольных измерений тех же образцов, выполненных более точными приборами с использованием более совершенных методов измерения.

Случайные погрешности обусловлены влиянием на результат измерения значительного количества неконтролируемых случайных факторов: вибрации, неровностей поверхности образца, трения в опорах измерительных приборов, наличия потоков воздуха и др. причин. При этом равновероятны как положительные, так и отрицательные отклонения от истинного значения. Малые, по величине погрешности, встречаются чаще.

В качестве меры случайной погрешности принято использовать абсолютную либо относительную (в случае пропорциональной ошибки) среднюю квадратическую погрешность.

Средняя квадратическая погрешность может быть найдена путем проведения многократных измерений на одном и том же образце. По полученным n значениям измеряемой величины $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n$ вычисляют среднее арифметическое, используемое в качестве приближения к истинному значению:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1.1)$$

Среднюю квадратическую погрешность единичного измерения находят по формуле

$$\Delta x_{cp.kv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1.2)$$

Случайная погрешность среднего арифметического из n измерений меньше погрешности единичного измерения:

$$\Delta \bar{x}_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.3)$$

Вместо проведения многократных измерений на одном образце для определения случайной погрешности обычно проводят двойные (контрольные) измерения на ряде образцов. Контроль, выполняемый по той же методике, на том же приборе, называют **внутренним**. Если контрольные измерения выполняются в другой лаборатории, по другой методике или на другом приборе, такой контроль называют **внешним**. Как правило, для внешнего контроля используются более совершенные методики и приборы.

Объем контрольных измерений зависит от общего количества образцов и составляет 5÷10%, а в особо ответственных случаях используют 100% контроль. При двойных измерениях вычисление абсолютной средней квадратической погрешности единичного измерения производится по формуле:

$$\Delta x_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2}{2n}} \quad (1.4),$$

где n - число контрольных измерений, x_{1i} - результат основного измерения i -го образца, x_{2i} - результат контрольного измерения i -го образца.

Если случайная погрешность вычисляется по данным внешнего контроля, в результаты измерений сначала должна быть введена поправка за имеющееся систематическое расхождение.

Как уже отмечалось, если ошибка пропорциональна значению измеряемой величины, относительная погрешность постоянна, поэтому в качестве меры случайной ошибки используют **относительную среднюю квадратическую погрешность**:

$$\delta x_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{1i} - x_{2i}}{x_i} \right)^2}{2n}} \times 100\% \quad (1.5),$$

где n - число контрольных измерений, x_{1i} - результат основного измерения i -го образца, x_{2i} - результат контрольного измерения i -го образца, $\bar{x}_i = \frac{x_{1i} + x_{2i}}{2}$ - среднее по результатам основного и контрольного измерений i -го образца.

Систематическая погрешность может быть обнаружена только при внешнем контроле, так как при повторных измерениях тем же прибором и по той же методике ошибка будет повторяться, и расхождения могут быть только случайного характера. Контрольные измерения единичных образцов, как правило, не позволяют выявить систематическое расхождение, так как, оказывается, невозможно разделить случайную и систематическую составляющую погрешности. Однако при наличии ряда контрольных измерений такая возможность появляется. При суммировании расхождений между основными и контрольными анализами (с учетом знака) случайные погрешности разных знаков взаимно компенсируются, тогда как систематическая погрешность, знак которой постоянен, накапливается и может быть вычислена по формуле:

$$\Delta x_{сист} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})}{n} \quad (1.6)$$

Так как случайные ошибки разного знака в этой формуле именно в силу своего случайного характера компенсируются не полностью, результат может получиться ненулевым даже при полном отсутствии систематической погрешности. Поэтому считается, что систематическая погрешность отсутствует, если значение, найденное по формуле (1.6), не превышает величины $\frac{5\Delta x_{сл}}{\sqrt{n}}$.

При пропорциональном характере ошибок результаты измерения могут регулярно завышаться (или занижаться) в $k = 1 + \frac{\delta_{сист, \%}}{100}$ раз. В этом случае

систематическую погрешность можно найти, просуммировав относительные расхождения основных и контрольных измерений:

$$\delta_{\text{сист}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_{1i} - x_{2i}}{x_i}}{n} \times 100\% \quad (1.7)$$

Вычисление погрешностей производят, сводя в таблицу результаты основных и контрольных измерений. Ниже приведена форма таблицы для вычисления абсолютных погрешностей.

Таблица 1.1

Таблица обработки контрольных измерений
методом (указать метод измерений)

Внешний /внутренний контроль (указать вид контроля)

№ п/п	№ обр.	x ₁ (ед. изм.)	x ₂ (ед. изм.)	x ₁ -x ₂ (ед. изм.)	(x ₁ -x ₂) ² (ед. изм.)
1	2	3	4	5	6
1	4	262	264	-2	4
2	6	298	294	4	16
...
Σ					

Примечания

1) В верхней строке вместо x следует указать обозначение измеряемой величины (ρ, σ, η и т.п.).

2) Во второй строке указывается размерность измеряемой величины (Ом·м, г/см³ и др.).

В последней строке таблицы в колонках 5 и 6 подсчитываются суммы, необходимые для вычисления случайной и систематической (только при внешнем контроле) погрешности по формулам (1.4) и (1.6).

Наличие в результатах хотя бы одного промаха может существенно исказить оценку погрешности, поэтому попавшие в таблицу значения с грубыми ошибками просто вычеркиваются. Согласно теории, вероятность появления случайной ошибки с величиной, превышающей среднее квадратическое

значение погрешности в три раза и более, составляет 0,3%, поэтому все значения, где расхождение результатов анализа превышает указанную величину, следует считать промахами и не учитывать при расчете случайной и систематической погрешности.

Форма таблицы для расчета относительных погрешностей отличается только содержанием колонок 5 и 6, в которых вычисляется, соответственно, относительное расхождение и его квадрат (таблица 1.2). Относительное расхождение в этой таблице выражено в процентах.

Таблица 1.2

Таблица обработки контрольных измерений
методом (указать метод измерений)
Внешний /внутренний контроль (указать вид контроля)

№ п/п	№ обр.	x_1 (ед. изм.)	x_2 (ед. изм.)	x_1-x_2 (ед. изм.)	$(x_1-x_2)^2$ (ед. изм.)
1	2	3	4	5	6
1	4	2,62	2,64	-0,76	0,58
2	6	298	294	1,35	1,83
...
Σ					

2. Лабораторная работа №1: Построение гистограммы распределения физического свойства по выборке

Цель работы:

- 1. Оценка степени однородности выборки и соответствия закона распределения изучаемого свойства принятой гипотезе*
- 2. Определение параметров распределения: среднего значения и дисперсии (среднего квадратического отклонения)*

Краткая теория

Для решения различных геологоразведочных задач необходимо знать различные физические свойства и петрофизические величины горных пород.

Петрофизические величины не являются константами; их значения определяются степенью однородности пород, температурой, давлением, условиями происхождения и жизни пород, их возрастом. В петрофизике горную породу рассматривают как геологическое тело сложного полиминерального состава при термодинамических условиях естественного залегания. Общим и важнейшим свойством геологических тел является их неоднородность; каждое из геологических тел содержит различные (по происхождению, размерам и другим особенностям) виды неоднородности. В совокупности они и определяют неоднородность тела в целом.

Можно выделить, по крайней мере, три типа неоднородностей: по фазовому составу, по компонентному (минеральному) составу, и текстурно-структурную неоднородность.

Фазовая неоднородность: порода может быть представлена тремя фазами - твердой, жидкой и газообразной, или двумя - твердой, жидкой или твердой, газообразной.

Компонентная неоднородность: каждая фаза представлена одним, двумя или несколькими минералами (твердая фаза), жидкостями (жидкая фаза), газами

(газообразная фаза). Каждый минеральный, жидкий или газообразный компонент имеет определенный химический состав.

Структурно-текстурная неоднородность характеризует более сложное образование, состоящее из двух или более различных пород, чередующихся в объеме изучаемого геологического объекта.

На первичную неоднородность может накладываться вторичная, связанная с процессами выветривания, трещиноватости, метаморфизма, привносом и выносом вещества и т.д.

Поэтому, описывая геологические объекты и горные породы, можно говорить не о точных значениях тех или иных характеристик, а лишь о некоторых вероятностных оценках этих характеристик. При их изучении приходится иметь дело с массовыми явлениями, которые подчиняются законам статистики - законам больших чисел. То есть, для определения какой-либо физической величины конкретного геологического объекта необходимо отбирать большое число образцов и исследовать их методами математической статистики.

Значение какого-либо свойства x в данной точке пространства (данном образце) можно считать случайной величиной, изменяющейся в некоторых пределах. Вероятность её нахождения $p(x)$ в интервале от x до $x+dx$ определяется соотношением:

$$p(x) = f(x) \times dx \quad (2.1),$$

где $f(x)$ – плотность вероятности.

Плотность вероятности определяется законом распределения случайной величины. Встречаются нормальный закон распределения (закон Гаусса), логнормальное распределение, гамма-распределение, экспоненциальное распределение, распределение Стьюдента, распределение Фишера и т.д.

Физические свойства горных пород распределяются по нормальному и логнормальному закону.

При нормальном законе (закон распределения Гаусса) случайная величина описывается выражением:

$$f(x) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - M_x)^2}{2S^2}\right) \quad (2.2),$$

где M_x - математическое ожидание (наиболее вероятное значение) параметра x ,
 S - стандарт распределения.

Величина $D = S^2$, представляющая собой математическое ожидание величины $(x - M_x)^2$, носит название дисперсии. Значение математического ожидания близко к выборочному среднему $M_x \approx \bar{x}$. При этом погрешность определения математического ожидания зависит как от степени рассеяния значений измеряемой величины x , так и от объёма выборки: $S_{M_x} = \frac{S}{\sqrt{N}}$, что приводит к необходимости отбора значительного числа образцов

Как правило, по нормальному закону распределены петрофизические свойства, диапазон вариаций которых сопоставим с их средним значением. Например, плотность горных пород варьируется в пределах 1,5 – 3,5 г/см³.

Кривая распределения имеет симметричный вид (Рис. 2.1, а). Для такого закона распределения среднее арифметическое значение будет совпадать с центром вершины кривой, т.е. с математическим ожиданием.

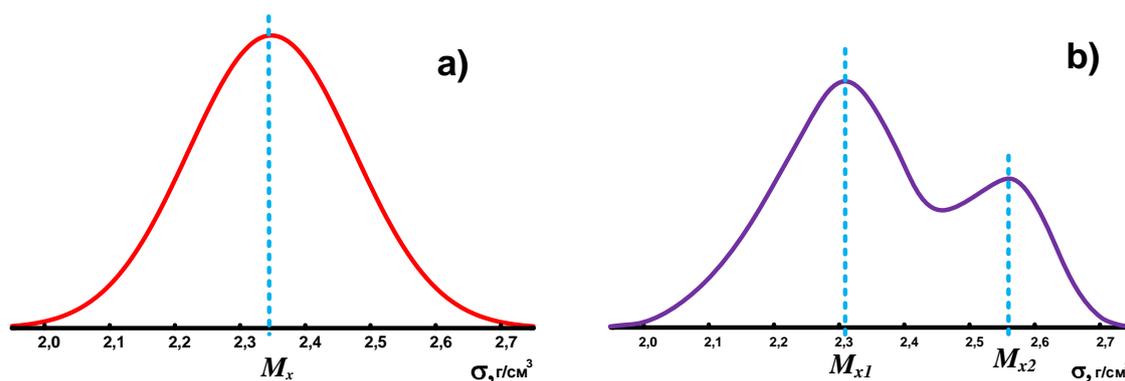


Рис. 2.1

Физические свойства горных пород могут иметь многомодальные распределения, когда значения свойства в выборке распределяются относительно двух или более центров (Рис. 2.1, б). Полиmodalность свидетельствует о неоднородности выборки, когда в одну группу оказались

объединены породы, отличающиеся по каким-либо характеристикам (возраст, минеральный состав, условия образования и т.д.)

Логнормальный закон описывает распределение, когда изучаемое свойство может принимать значения, отличающиеся друг от друга на несколько порядков (Рис. 2.2, а). При этом по нормальному закону распределён логарифм измеряемой величины (Рис. 2.2, б):

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot S \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \overline{\ln X})^2}{2S^2}\right) \quad (2.3),$$

где $\overline{\ln X}$ - среднее значение логарифма

S - стандарт распределения.

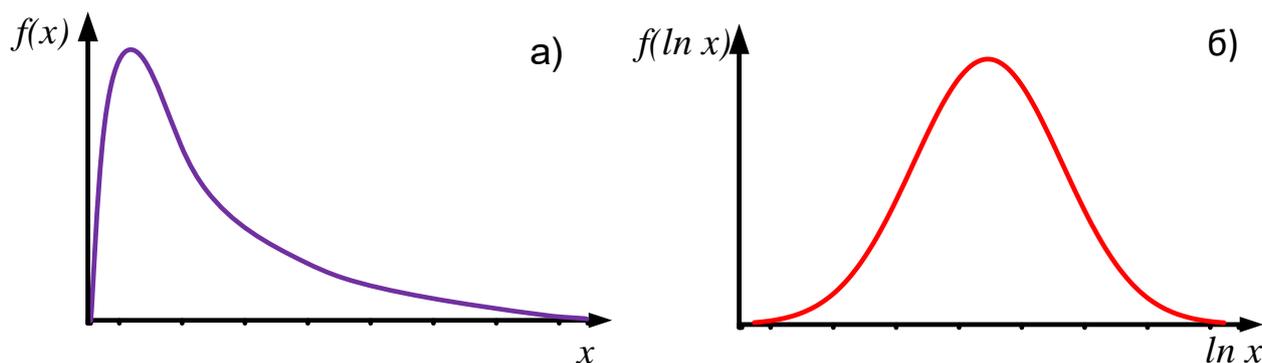


Рис. 2.2

Логнормальный закон распределения характерен для такого параметра, как магнитная восприимчивость горных пород.

Оба рассмотренных закона имеют один максимум, соответствующий среднему значению параметра (при нормальном распределении) или среднему значению логарифма (при логнормальном распределении). Кривая нормального распределения симметрична относительно центра (Рис.2.3, а). При логнормальном распределении (Рис.2.3, б) кривая также будет симметричной, если по оси абсцисс откладывается логарифм изучаемой величины.

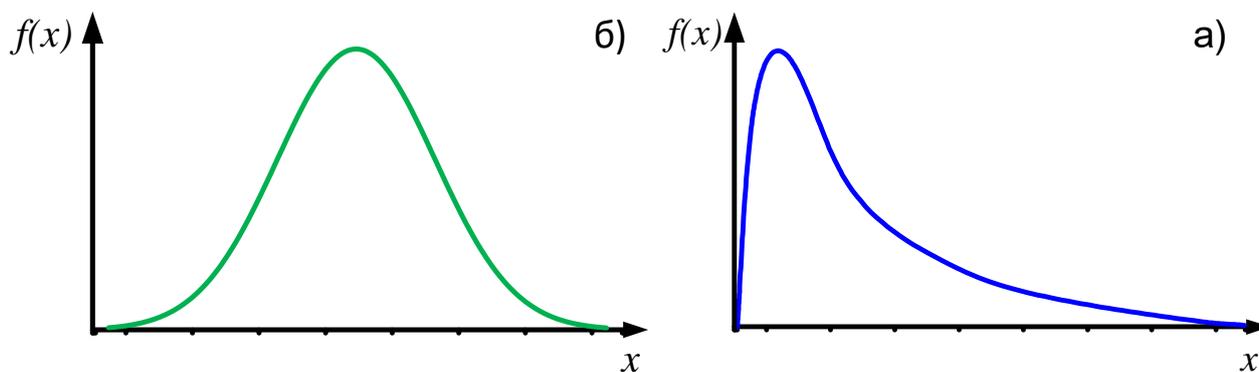


Рис.2.3. а) нормальное распределение; б) логнормальное распределение

Поэтому при нахождении искомой физической величины в выборке мало знать среднее арифметическое значение.

Наиболее полную статистическую характеристику объекта исследования дает гистограмма распределения параметра x . Для её построения в выборке находят минимальное и максимальное значение искомой величины x . Весь диапазон изменения физической величины делят на некоторое количество интервалов - M . Считают, сколько значений физического свойства образцов из выборки попало в каждый интервал. Строят ступенчатый график, где по горизонтальной оси откладывают значения физического свойства, а по вертикальной – частоту попадания в интервал (Рис. 2.4.). Через центры ступеней графика проводят плавную вариационную кривую, которая показывает закон распределения и дисперсию значений в выборке.

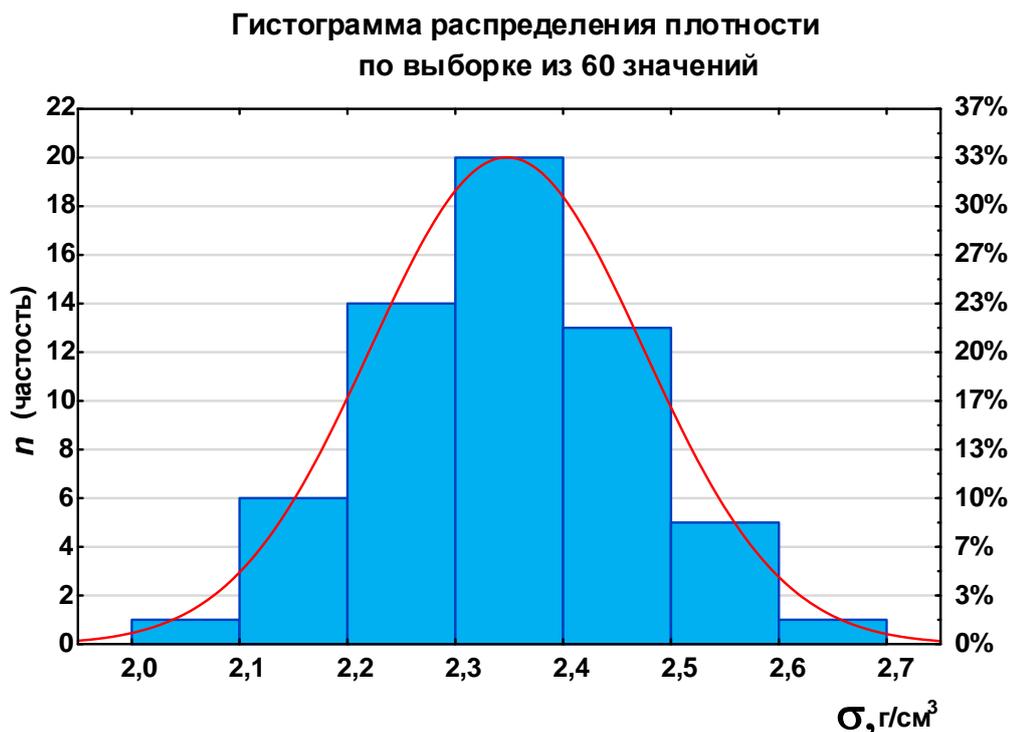


Рис. 2.4. Гистограмма распределения плотности

Дисперсия показывает насколько сильно образцы в выборке отличаются от среднего значения. Например, имеются две выборки – 1 и 2 (Рис. 2.5).

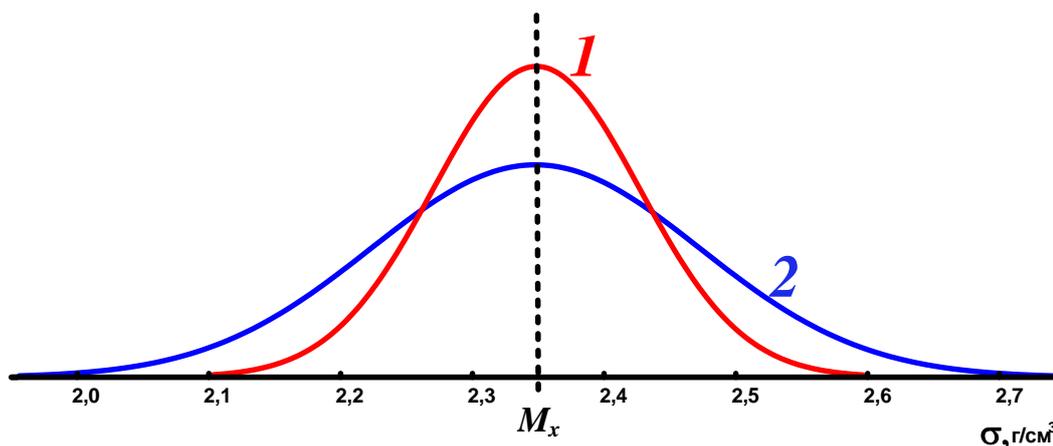


Рис. 2.5

Среднее значение (математическое ожидание M_x) для этих выборок одинаково. Однако образцы во второй выборке значительно сильнее отличаются от среднего значения. Оценить отклонение можно по величине стандартного среднеквадратического отклонения (ССО):

$$S = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (2.4)$$

где S - стандартное среднеквадратическое отклонение (стандарт), D – дисперсия, x_i значение физического свойства, \bar{x} - среднее значение физического свойства, N – количество значений в выборке.

По величине ССО можно оценить, насколько сильно образцы в выборке отличаются от среднего значения (Рис. 2.6).

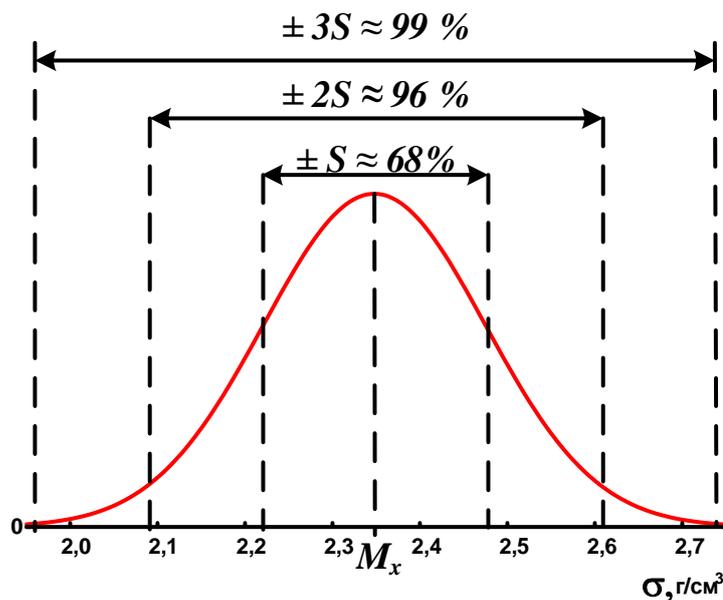


Рис. 2.6

2. а. Построение гистограммы распределения плотности (нормальный закон)

Поскольку плотность породообразующих минералов лежит в пределах от 2,5 до 3,5 г/см³, плотность горных пород также будет варьироваться в довольно узких пределах. Поэтому можно предполагать, что в случае однородной выборки закон распределения будет близок к нормальному.

Порядок выполнения работы.

1. Определяем количество значений N искомого физического свойства X в выборке;
2. Последовательно перебирая все значения в выборке находим минимальное и максимальное значение - x_{min}, x_{max} ;
3. Рассчитываем количество интервалов M для построения гистограммы по формуле Старджесса:

$$M=1+3.3lg(N), \quad (2.5)$$

где N – количество значений в выборке (для не представительной выборки, с количеством значений менее 100 формула упрощается - $M=3.3lg(N)$);

4. Рассчитываем ширину интервала:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{M} \quad (2.6)$$

5. находим границы диапазонов. Левая граница первого интервала - x_{\min} , правая - $x_{\min} + \Delta x$. Левая граница второго интервала - $x_{\min} + \Delta x$, правая – $(x_{\min} + \Delta x) + \Delta x$. Она же является левой границей третьего интервала. Правая граница третьего интервала увеличивается на Δx , и так далее. Правая граница последнего интервала – значение близкое к x_{\max} .

6. Последовательно перебирая все значения в выборке, определяем, в какой интервал попадает каждое значение. Попадание в интервал отмечаем черточкой в столбце 3 таблицы. Заполняем 4 и 5 столбцы таблицы:

Таблица 2.1

№ интервала, k	Границы интервалов, [ед]	Количество попаданий	Частость n_k , шт.	Ср. знач. в интервале x_k , [ед]	$n_k \cdot x_k$, [ед]	$x_k - \bar{x}$, [ед]	$(x_k - \bar{x})^2 \cdot n_k$, [ед]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2,44-2,54		7	2,49	17,43		
2	2,54-2,64		10	2,59	25,90		
3	2,64-2,74		15	2,69	37,66		
....		
M							
					Σ		Σ

7. По второму и четвертому столбцу таблицы строим гистограмму. Для этого определяем горизонтальный и вертикальный масштаб. Горизонтальный и вертикальный масштаб гистограммы следует выбрать таким образом, чтобы график имел и ширину и высоту порядка 10 – 15. Для удобства

интерполяции в 1 см должны быть значения кратные 1, 2 или 5 единиц измеряемой величины;

8. Строим столбчатую диаграмму. Ориентируясь на середины верхних площадок столбцов проводим плавную линию распределения так, чтобы площадь между осью x и линией распределения была равна площади, очерченной гистограммой.
9. Находим среднее значение искомого физического свойства по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad (2.7)$$

или, используя формулу средневзвешенного значения по интервалам,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^M x_k \cdot n_k}{N}, \quad (2.8)$$

где k – номер диапазона, x_k – среднее значение физического параметра в k -том интервале.

10. Заполнив столбцы 7 и 8, находим величину дисперсии и стандартного среднеквадратического отклонения (ССО), характеризующую отклонение значений физического свойства в выборке от среднего. Так как среднее значение в каждом интервале уже найдено, для расчёта удобно использовать следующую формулу:

$$S = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (x_k - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (2.9)$$

11. Пишем отчет по выполненной с выводом о цели работы, методике её выполнения и анализе полученных результатов.

Лабораторная работа №2: Построение гистограммы распределения физического свойства с логнормальным законом распределения

Краткая теория

При логнормальном распределении случайной величины, она распределяется по логарифмическому закону (Рис. 2.1 а):

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot s \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(x) - \overline{\ln(x)})^2}{2 \cdot s^2}}, \quad 2.1$$

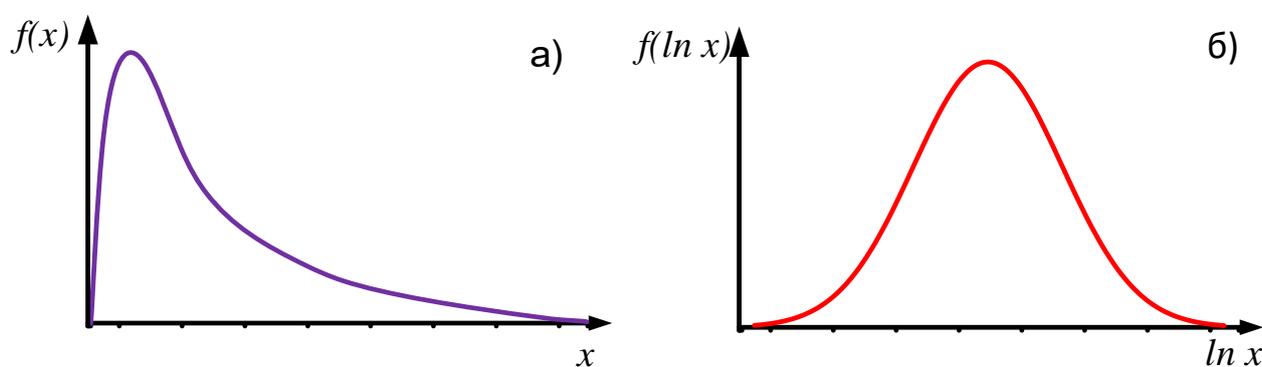


Рис. 2.1

При этом, логарифм физической величины распределяется по нормальному закону (Рис. 2.1. б).

Следовательно, нужно прологарифмировать все значения в выборке и исследовать значения логарифмов. Можно несколько облегчить задачу, если прологарифмировать максимальное и минимальное значение в выборке, найти границы интервалов в логарифмах физической величины, а затем перейти от логарифмов к значения физической величины и получить границы интервалов в единицах исследуемой величины. Далее строить гистограмму, как для нормального закона распределения.

Порядок выполнения работы.

1. Определяем количество значений N искомого физического свойства x в выборке и по формуле **Старджесса (2.5.а)** находят число интервалов M для построения гистограммы;

2. Последовательно перебирая все значения в выборке находим минимальное и максимальное значение - x_{min} , x_{max} ;
3. Условно вводим переменную $y = lg(x)$ (не имеет большого значения натуральный логарифм или десятичный) Находим y_{min} , y_{max} ($y_{min} = lg(x_{min})$, $y_{max} = lg(x_{max})$)
4. Рассчитываем количество интервалов M для построения гистограммы по формуле Старджесса:

$$M=1+3.3lg(N),$$

где N – количество значений в выборке (для не представительной выборки, с количеством значений менее 100 формула упрощается - $M=3.3lg(N)$);

5. Рассчитываем ширину интервала $\Delta y = \frac{y_{max} - y_{min}}{M}$;
6. Находим границы интервале. Левая граница первого интервала - y_{min} , правая - $y_{min} + \Delta y$. Левая граница второго интервала - $y_{min} + \Delta y$, правая – $(y_{min} + \Delta y) + \Delta y$. Она же является левой границей третьего интервала. Правая граница третьего интервала увеличивается на Δy , и так далее. Правая граница последнего интервала - y_{max} . Заносим результаты в таблицу;
7. Переводим значения границ интервалов из логарифмов в значения физической величины – $lg x=y$, т.е. $x=10^y$. Заполняем границы интервалов в таблице;
8. Последовательно перебирая все значения в выборке, определяем, в какой интервал попадает каждое значение. Попадание в интервал отмечаем черточкой. Результаты заносим в таблицу:

ЧНомер интервала, k	Границы интервалов, [ед]		Количество попаданий в интервал	Частость n_k , шт.	Ср. знач. в интервале x_k , [ед]	$y_k \cdot n_k$, [ед]	$y_k - \bar{y}$, [ед]	$(y_k - \bar{y})^2 \cdot n_k$ [ед]
1	2		3	4	5	6	7	8
	y	0,93-1,38		3	1,155	17,43		

1	x	8-24						
2	y	1,38-1,83		10	1,605	25,90		
	x	24-68						
3	y	1,83-2,28		14	2.055	37,66		
	x	68-190						
.....	y				
	x							
.....	y							
	x							
M	y							
	x							
						Σ		Σ

Таблица 2.2

Границы интервалов, [ед]		Количество попаданий	Частость n_k , шт.	Ср. знач. в интервале y_k	$n_k \cdot y_k$	$y_k - \bar{y}$	$(y_k - \bar{y})^2$
y	0,387-0,405		7				
x	2,44-2,54						
y	0,405-0,422		10				
x	2,54-2,64						
y	0,422-0,438		15				
x	2,64-2,74						

9. По первому и третьему столбцу таблицы строим гистограмму. Для этого определяем горизонтальный и вертикальный масштаб. Горизонтальный масштаб выбираем таким образом, чтобы график поместился на лист бумаги. Выбираем метки на оси, кратные 1, 2, 5, 10. Вертикальный масштаб выбираем таким образом, чтобы высота графика составляла 10-15см.

10. Строим столбчатую диаграмму. Через середины верхних площадок столбцов проводим плавную линию распределения.

11. Находим среднее значение логарифма физического свойства по формуле:

$$\overline{\lg x} = \frac{\sum_{k=1}^M y_k \cdot n_k}{N},$$

где k – номер диапазона, y_k – среднее значение логарифма физического параметра в k -том диапазоне;

12.Находим величину стандартного среднеквадратического отклонения логарифма физической величины по формуле:

$$S(\lg x) = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (y_k - \bar{y})^2 * n_k}{N-1}},$$

13.Пишем вывод с указанием того что исследовали, каким методом и какие получили результаты.

3. Лабораторная работа №3: Построение гистограммы распределения в программе «STATISTICA»

Цель работы:

- 1. Оценка степени однородности выборки и соответствия закона распределения изучаемого свойства принятой гипотезе;*
- 2. Определение параметров распределения: среднего значения и дисперсии (среднего квадратического отклонения);*
- 3. Ознакомление с программой обработки статистических данных.*

Порядок выполнения работы.

Для построения гистограммы в программе «STATISTICA», нужно создать новую рабочий лист – электронную таблицу (spreadsheets) (Рис. 3.1)

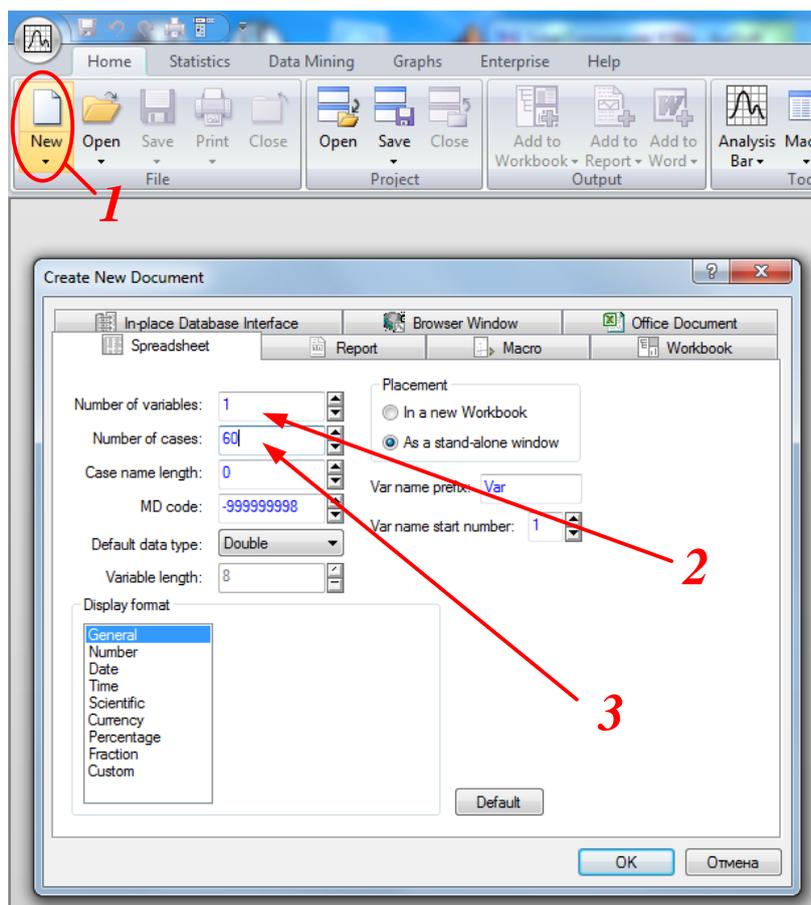


Рис. 3.1

Указываем в диалоговом окне количество вариационных рядов – 1, количество элементов в ряду – 60 (в соответствии с заданием). Нажимаем кнопку «ОК» и заполняем появившуюся таблицу, данными из задания. После окончания занесения данных, открываем вкладку «Graphs» главного меню. Кнопкой «Histogram» из раздела «Common», или такой же кнопкой из выпадающего списка «2D» выбираем построение гистограммы (Рис. 3.2).

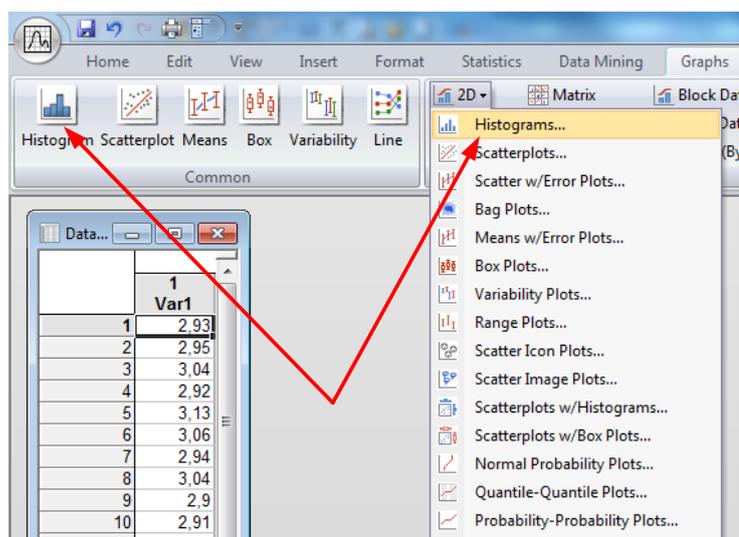


Рис. 3.2

В появившемся диалоговом окне переходим на вкладку «Advanced» (Рис. 3.3)

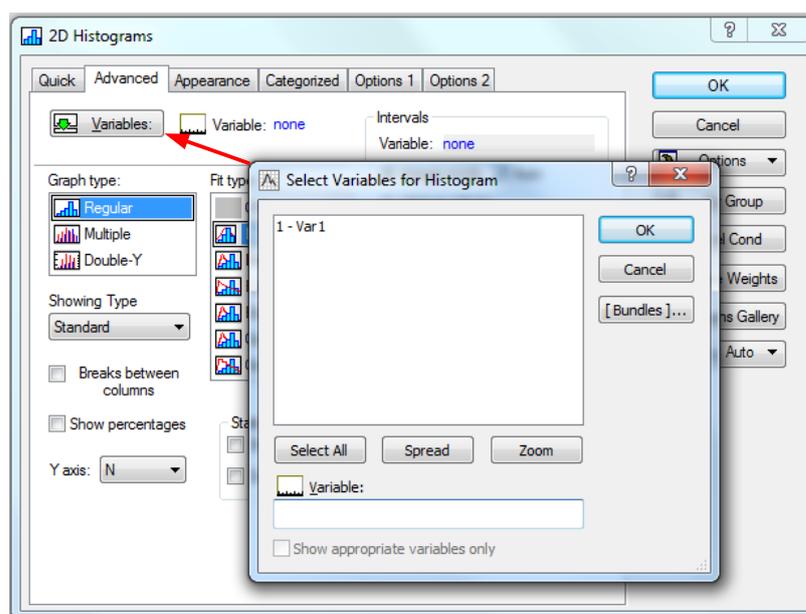


Рис. 3.3

С помощью кнопки «Variables», выбираем вариационный ряд, по которому будем строить гистограмму. Затем выбираем тип графика «Graph type» (Рис. 3.4 1) и закон распределения «Fit type» (Рис. 3.4 2). На этой же вкладке выбираем количество интервалов для построения – автоматически «Integr mode» или в явном виде задавая значение «Categories» (рассчитав их, например, по формуле Старджесса – $M=1+3,3 \lg N$) (Рис. 3.4 3). Для отображения по вертикальной оси

частости в единицах, процентах или единицах и процентах, выбираем необходимый пункт в выпадающем списке Рис. 3.4 4).

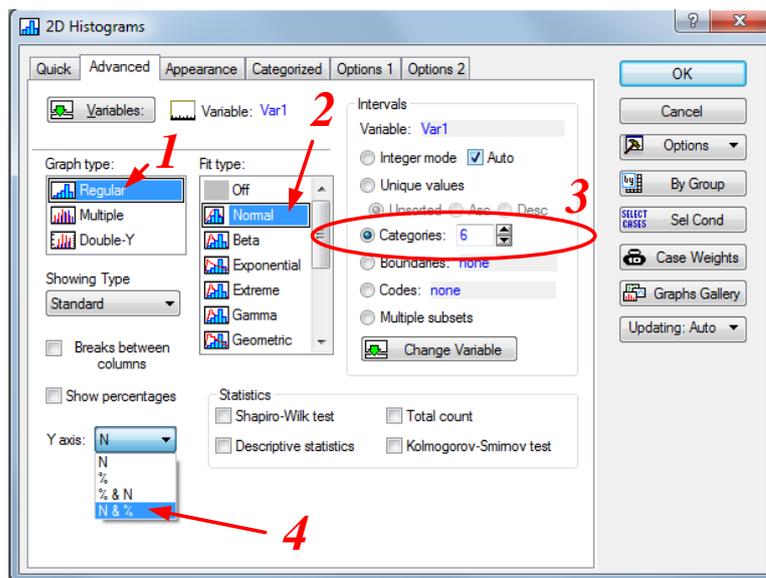


Рис. 3.4

После нажатия кнопки «ОК», появляется окно с построенной гистограммой (Рис. 3.5)

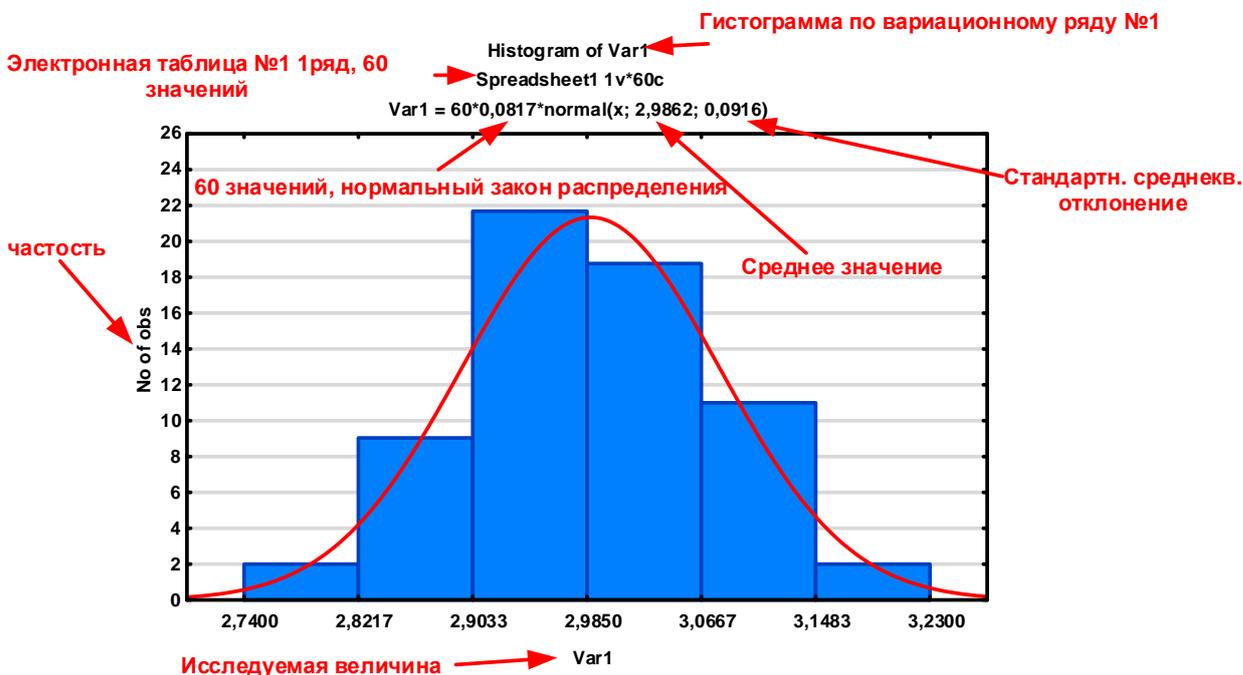


Рис. 3.5

В заголовке указан ряд, по которому произведено построение, число членов ряда, ширина интервалов, тип распределения, среднее значение и стандарт распределения.

В случае, если выбран логнормальный закон распределения, программа находит среднее значение натурального логарифма членов ряда и его стандартное отклонение от центра. Для перехода к десятичным логарифмам эти значения нужно умножить на $lg e = 0,43429$.

Оформляем диаграмму, подписывая её название, оси, цвета. Свойства каждого элемента вызываются двойным кликом мыши.

Копируем оформленную диаграмму из контекстного меню или комбинацией клавиш «Ctrl+C» и вставляем её в текстовый редактор (например, MS Word) для оформления отчета.

В отчете следует описать цель работы и порядок её выполнения. В выводе указать принятый закон распределения, полученное среднее значение исследуемого свойства по выборке и его стандартное среднеквадратическое отклонение. Полученные результаты сопоставьте с параметрами распределения, найденными ранее.

4. Лабораторная работа №4: Определение корреляционных зависимостей

Цель работы:

- 1. Определить, существует ли связь между исследуемыми величинами;*
- 2. Если величины связаны, оценить тесноту связи по величине коэффициента корреляции;*
- 3. Оценить возможность определения значений одной из рассматриваемых величин по результатам измерения другой из них и уровень возникающих при этом погрешностей.*

Краткая теория

Не всегда возможно измерить интересующую величину путем прямых измерений. В таких случаях приходится прибегать к косвенным измерениям, когда измеряется другая величина, связанная с исследуемой величиной функциональной зависимостью. Например, для определения силы тока в электрической цепи, достаточно знать величину падения напряжения на известном сопротивлении. Напряжение U и сила тока I связаны между собой законом Ома:

$$U = I * R,$$

где R - известное значение сопротивления.

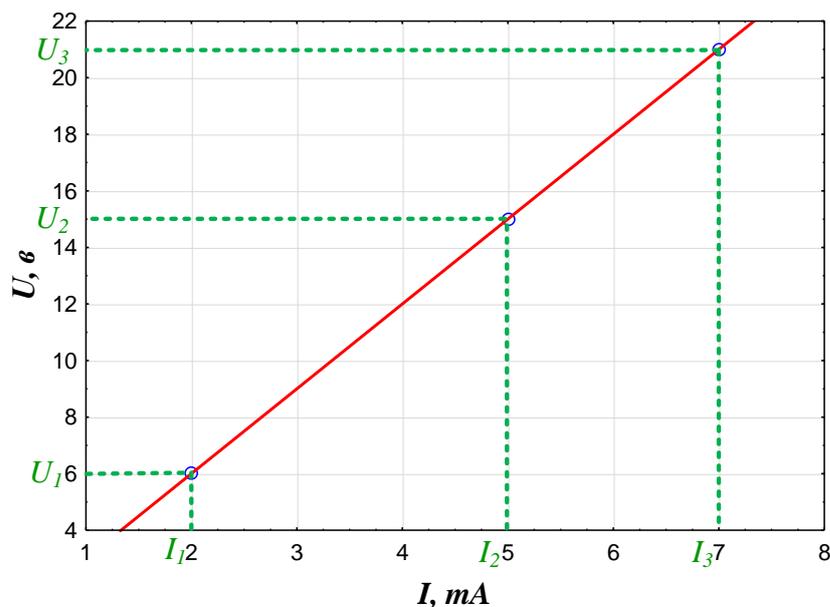


Рис. 4.1

При этом каждому значению силы так соответствует строго определенное значение напряжения. Такая зависимость называется функциональной (Рис. 4.1). В петрофизике, в силу статистической природы физических свойств, таких зависимостей не наблюдается. Наблюдаются вероятностные зависимости, где каждому значению одной величины соответствует некоторый диапазон изменения зависимой величины (Рис. 4.2), поскольку петрофизические величины являются сложными функциями, зависящими от многих факторов.

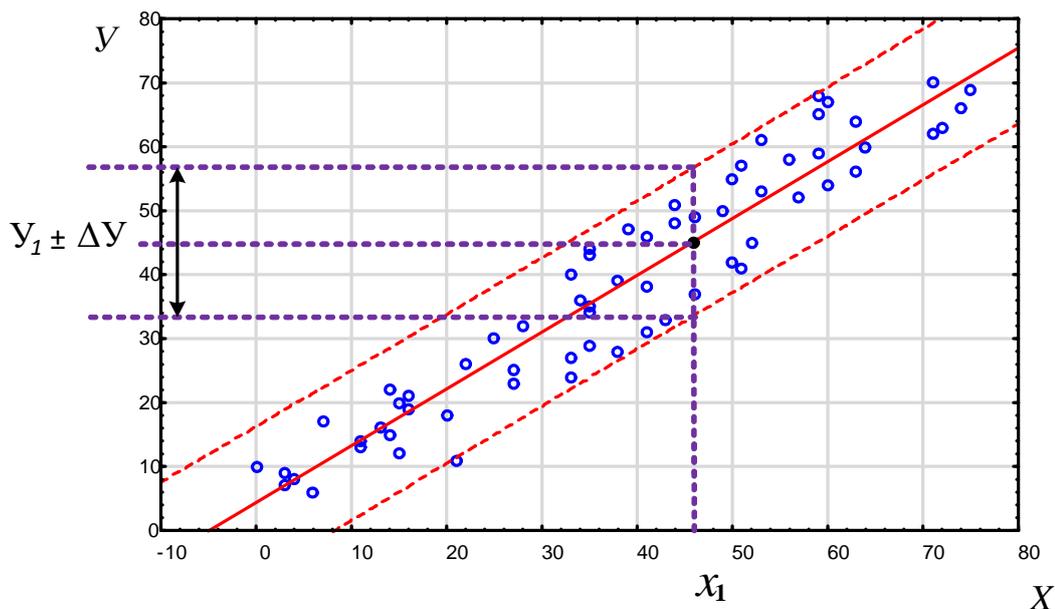


Рис. 4.2

К примеру, значение плотности любой горной породы зависит от условий образования, пористости, характера насыщения, глубины залегания, температуры и давления. Теоретически плотность можно найти по формуле:

$$\sigma = \delta_{\text{ТВ}} * (1 - k_{\text{П}}) + \delta_{\text{Ж}} * k_{\text{П}} * V_{\text{Ж}} + \delta_{\text{Г}} * k_{\text{П}} * (1 - V_{\text{Ж}}),$$

где $\delta_{\text{ТВ}}$, $\delta_{\text{Ж}}$, $\delta_{\text{Г}}$ – компонентная плотность твердой фазы, жидкой фазы и газообразной фазы, $V_{\text{Ж}}$ – объемная доля жидкой фазы в поровом пространстве (доля объема порового пространства, занятого жидкостью). Каждая фаза может быть представлена одним, двумя или несколькими минералами (твердая фаза), жидкостями (жидкая фаза), газами (газообразная фаза). Каждый минеральный, жидкий или газообразный компонент может иметь определенный химический состав. В результате плотность одной и той же горной породы может меняться в некоторых пределах. Следовательно, оценка пористости по известной плотности будет производиться с некоторой погрешностью.

Связь между плотностью и пористостью линейная.

Прямая, описывающая зависимость между величинами, проведенная так, что сумма квадратов отклонения измеренной величины от значений минимальна, называется линией регрессии (тренда).

Вследствие вероятностной природы петрофизических связей возникает погрешность, при проведении косвенных измерений по статистическим зависимостям.

Оценить тесноту связи, а, следовательно, и величину погрешности, можно по коэффициенту корреляции R .

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Коэффициент корреляции показывает насколько две величины x и y связаны между собой, то есть насколько изменение одной величины вызывает изменение другой.

Коэффициент корреляции находится от 0 (зависимость отсутствует) до 1 (функциональная зависимость). Положительный знак коэффициента корреляции говорит о прямой зависимости, отрицательный – об обратной.

Если коэффициент корреляции находится в диапазоне $0.7 \leq R \leq 1$, то считается между величинами x и y присутствует тесная связь. При этом величину y можно определить, зная x , с высокой точностью.

Если коэффициент корреляции находится в диапазоне $0.5 \leq R \leq 0.7$, то считается между величинами x и y имеется устойчивая связь. При этом величину y можно определить, зная x , с небольшой погрешностью.

Если коэффициент корреляции находится в диапазоне $0.3 \leq R \leq 0.5$, то считается между величинами x и y присутствует неустойчивая, слабая связь. При этом величину y определить можно, но с большой погрешностью.

Если коэффициент корреляции меняется в диапазоне $R \leq 0.3$, то считается между величинами x и y связь либо отсутствует, либо на данной выборке не выявлена.

Если связь между параметрами тесная, то уравнение регрессии хорошо описывает зависимость и разброс относительно линии регрессии (или поверхности) будет небольшим. Если связь слабая, то разброс точек относительно линии (поверхности) регрессии будет значительным.

Порядок выполнения работы

1. Получить задание для определения корреляционных зависимостей;
2. В программе STATISTICA создать новый рабочий лист (Рис. 4.3 1). Количество вариационных рядов (Рис. 4.3 2) задать 2. Количество ячеек установить в зависимости от задания (Рис. 4.3 3).

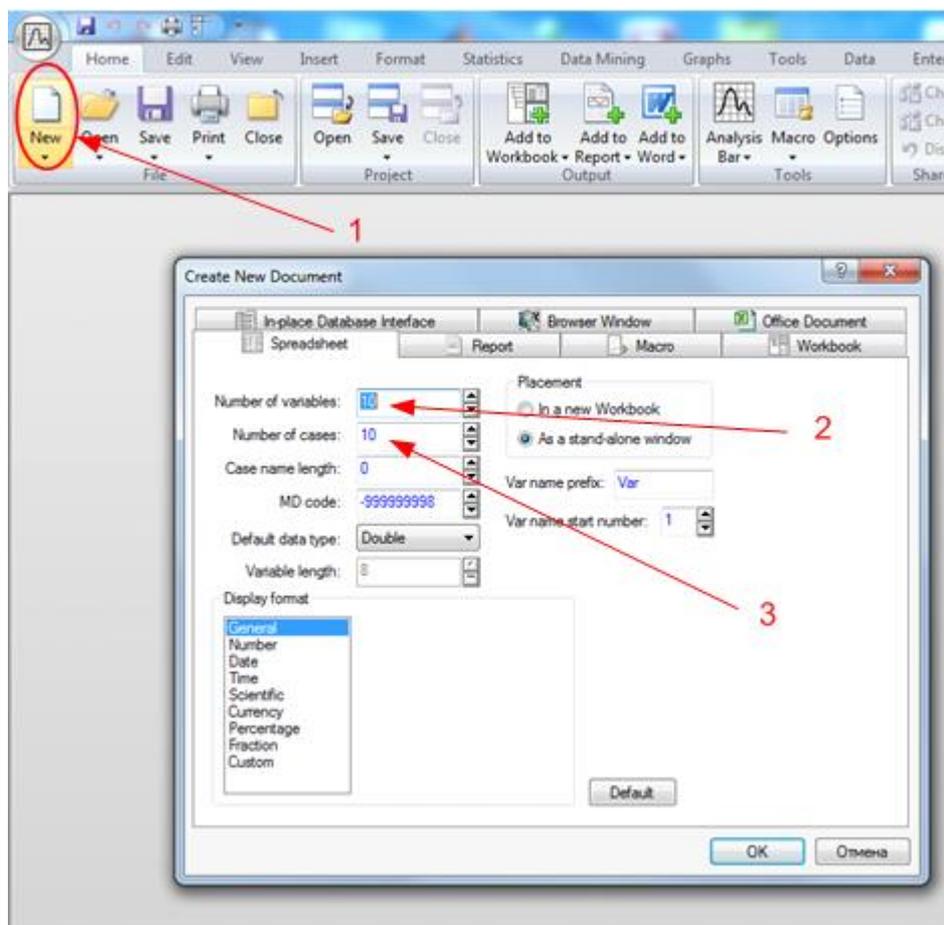


Рис. 4.3

3. Занести полученные в задании данные в рабочий лист.

Можно рассчитать значения вариационного ряда по заданной формуле.

Для этого нажимаем кнопку «Transform» во вкладке «Data» (Рис. 4.4).

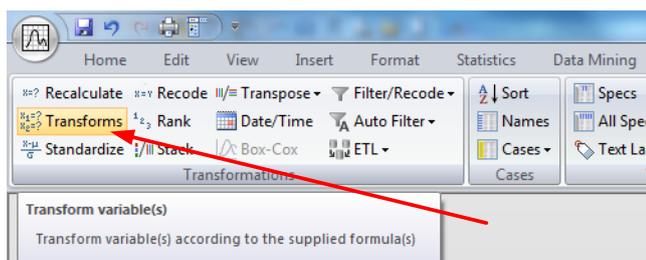


Рис. 4.4

В открывшемся окне записываем формулу для расчета ряда. Например, для расчета нового третьего ряда, являющегося квадратом от значений первого вариационного ряда, вводим формулу $V3=V2^2$ (Рис. 4.5):

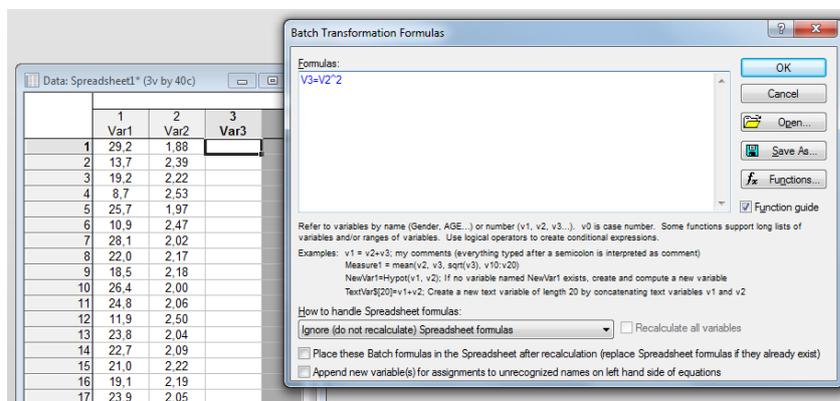


Рис. 4.5

- Оставив активным окно с рабочим листом, создать новый графический 2D документ – Scatterplot (Рис. 4.6);

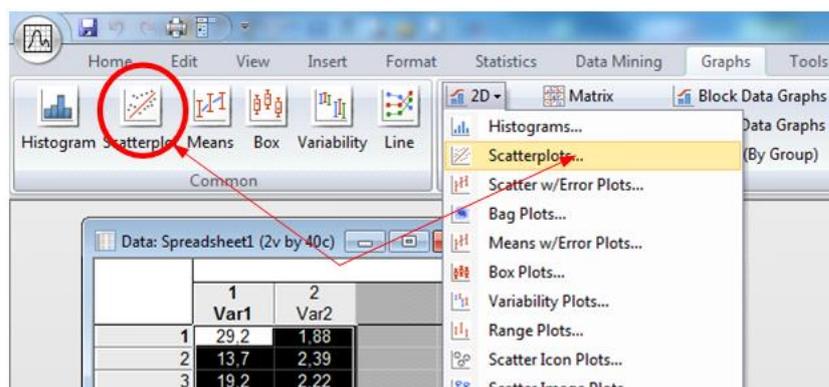


Рис. 4.6

- В диалоговом окне, с помощью кнопки «Variables», выбрать вариационные ряды (Рис. 4.7);

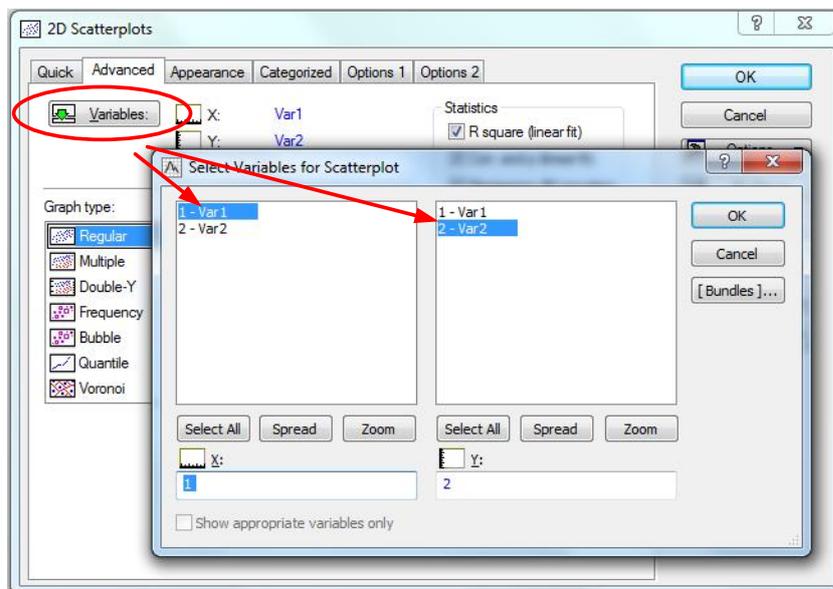


Рис. 4.7

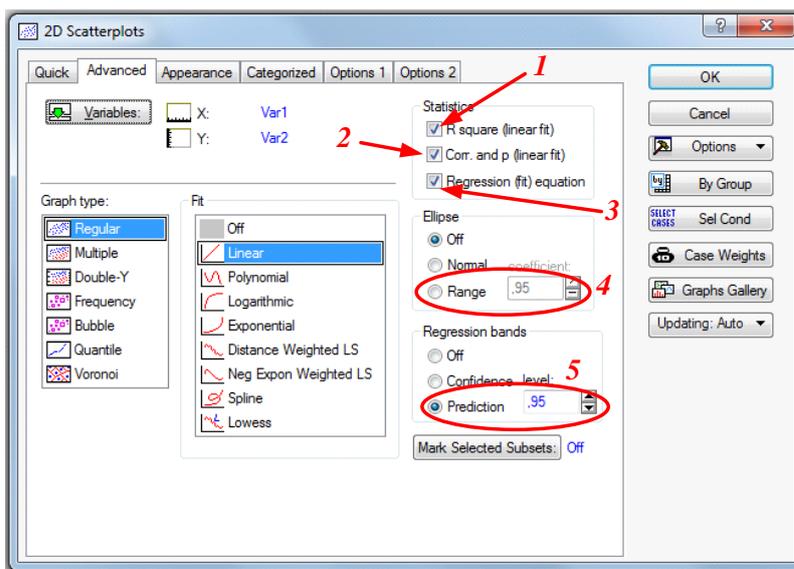


Рис. 4.8

6. С помощью галочек отметить, статистические величины вывести на экран – квадрат коэффициента корреляции (1) (Рис. 4.8), коэффициент корреляции и параметр корреляции (2), уравнение регрессии (3). Также на экран можно вывести эллипс (4) и доверительный интервал (5). После нажатия на кнопку «ОК», на экран выведется построенная корреляционная зависимость (

Корреляционная зависимость между пористостью и плотностью

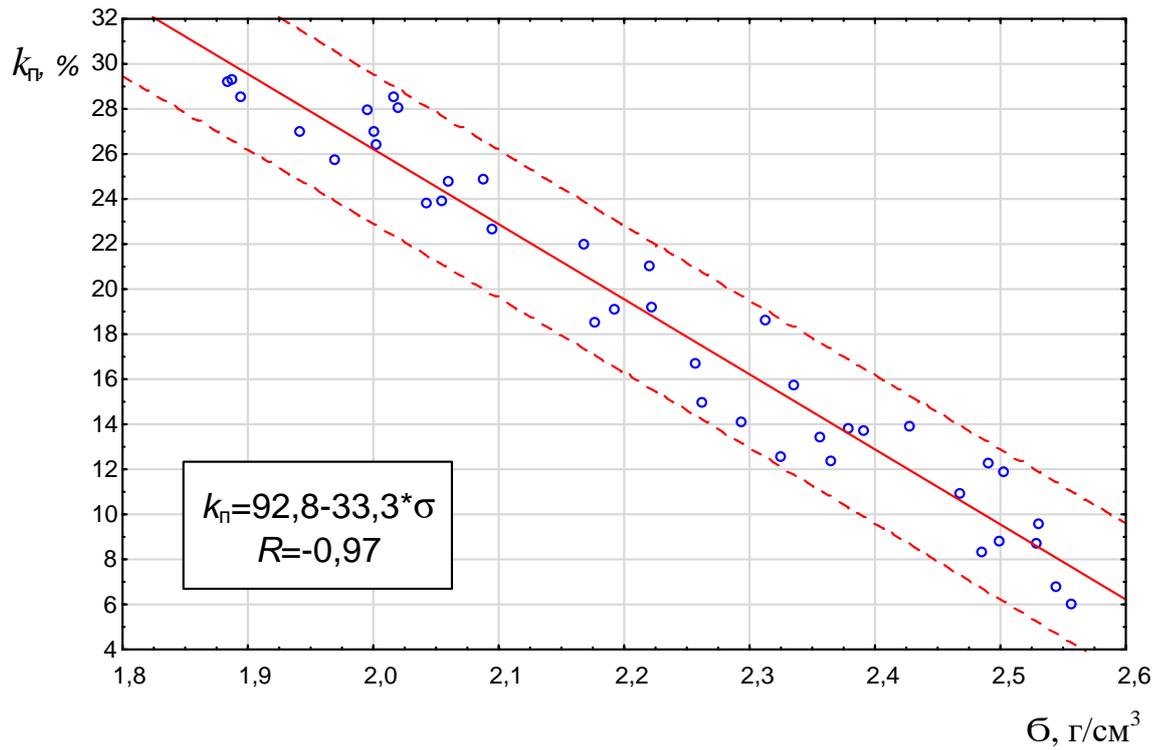


Рис. 4.9);

Корреляционная зависимость между пористостью и плотностью

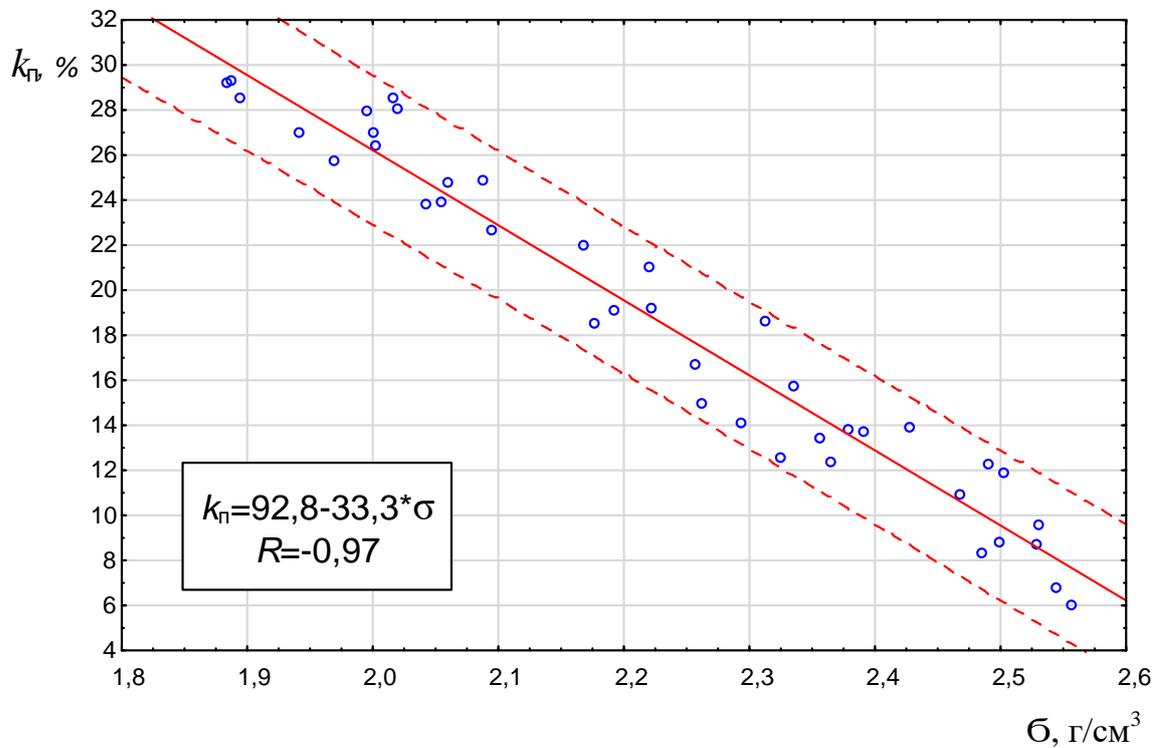


Рис. 4.9

7. Исправляем название диаграммы, с указанием какая зависимость для каких петрофизических величин построена;
8. Подписываем оси графика, с указанием единиц измерения;
9. Записываем уравнение регрессии в явном виде, указывая вместо x и y конкретные петрофизические величины;
10. По величине доверительного интервала¹ оцениваем (на качественном уровне – большая, малая, средняя) погрешность косвенного определения интересующей величины. σ

¹ Доверительным называется интервал, который с заданной вероятностью покрывает оцениваемый параметр. Так при вычислении коэффициента пористости по измеренным значениям плотности 95 % значений будет находиться в пределах области, ограниченной линиями $\pm 2S$, относительно линии регрессии, где S – стандартное среднеквадратическое отклонение измеренной пористости от найденной по линии тренда.

5. Лабораторная работа №5: Построение петрофизической модели по результатам исследования керна

Цель работы:

- 1. Научиться самостоятельно определять вид математической зависимости между исследуемыми величинами по результатам петрофизических исследований;*
- 2. Научиться представлять зависимости между исследуемыми величинами в виде графических палеток.*

Краткая теория

Основу геологической интерпретации данных ГИС составляют петрофизические зависимости типа "керна-керна", "керна-геофизика", "геофизика-геофизика" и "геофизика-испытания".

Для построений зависимостей сопоставляемые геофизические и коллекторские параметры измеряют на образцах керна в атмосферных и термобарических условиях, соответствующих пластовым, или определяются геофизическими методами. Петрофизические связи должны строиться на представительных коллекциях образцов керна, отражающих тип коллектора, диапазон и характер распределения изучаемых свойств. Например, петрофизическая зависимость (модель) типа "керна-керна" (построенная по результатам исследования керна) - $K_{во} = f(K_{п.эф})$, где $K_{во}$ - коэффициент остаточной водонасыщенности, $K_{п.эф}$ - коэффициент эффективной пористости (Рис. 5.1 Петрофизическая зависимость $K_{во} = f(K_{п.эф})$).

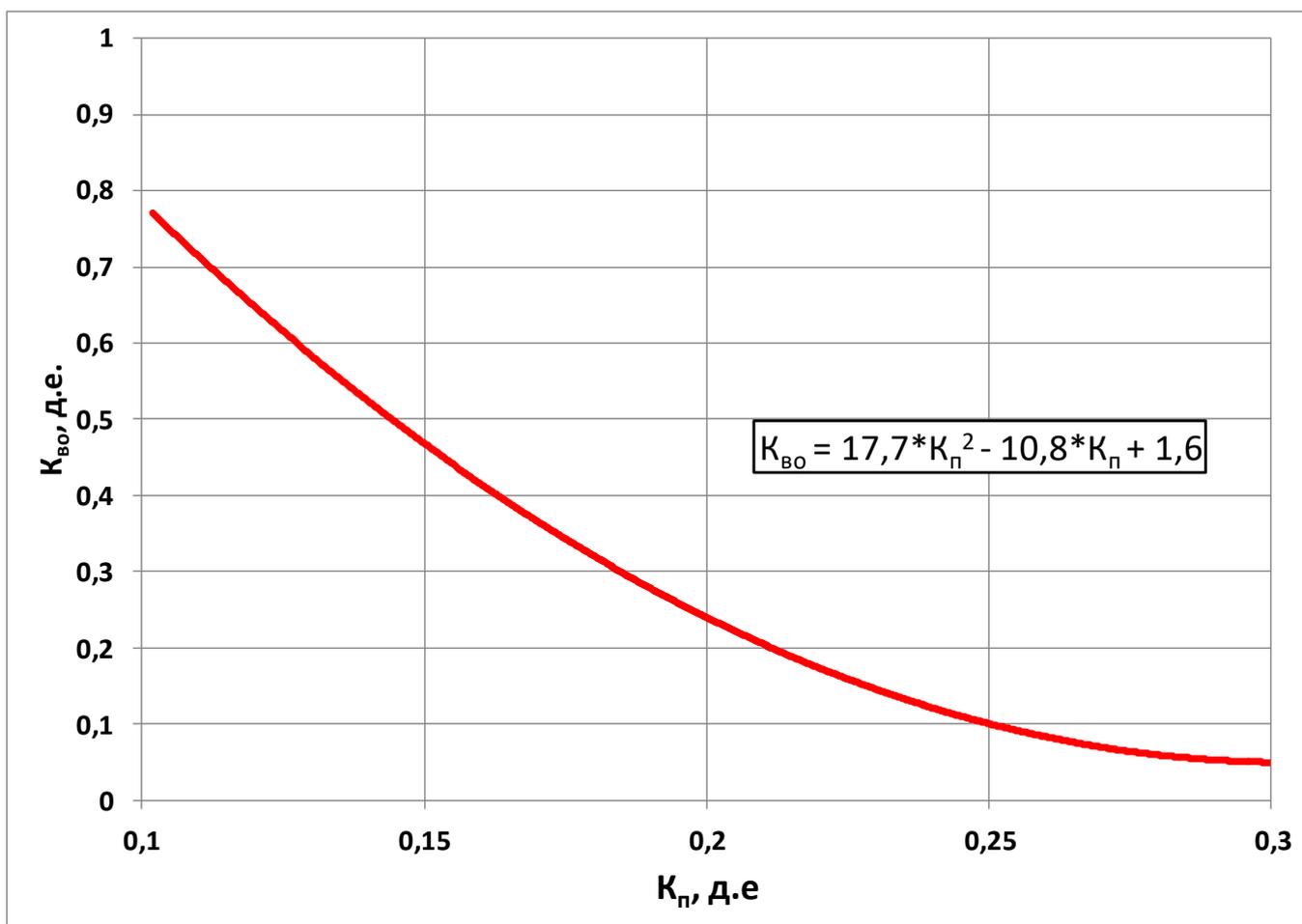


Рис. 5.1 Петрофизическая зависимость $K_{во}=f(K_{п.эф})$

Коэффициент остаточной водонасыщенности $K_{во}$ это отношение объема остаточной воды в горной породе к объему ее открытого пустотного пространства, выражается в долях единицы или процентах. Остаточная водонасыщенность зависит от структурных, текстурных особенностей пород-коллекторов, их минералогического состава, физико-химических свойств самой воды и вытесняющих ее нефти и (или) газа. Наиболее гидрофильными являются глинистые минералы, менее гидрофильны - кварц и карбонаты. Поскольку в терригенных коллекторах обычно присутствует примесь глинистых минералов, остаточная водонасыщенность в них выше, чем в карбонатных. Уменьшению остаточной водонасыщенности способствует гидрофобизация поверхности зерен, слагающих горную породу, за счет поверхностно-активных компонентов нефтей, таких как асфальтены, смолы, нафтеновые кислоты.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя данные о коэффициентах остаточной водонасыщенности и коэффициентах пористости по трем продуктивным пластам Ю¹, Ю², Ю³ Крапивинского нефтяного месторождения западной Сибири;
2. Построить корреляционные зависимости для каждого из пластов и определить для них уравнения квадратичной регрессии;
3. По уравнениям регрессии построить в графическом виде палетки, позволяющие определить остаточную водонасыщенность в каждом из пластов по известному коэффициенту пористости.
4. Оценить точность зависимостей по коэффициенту корреляции.

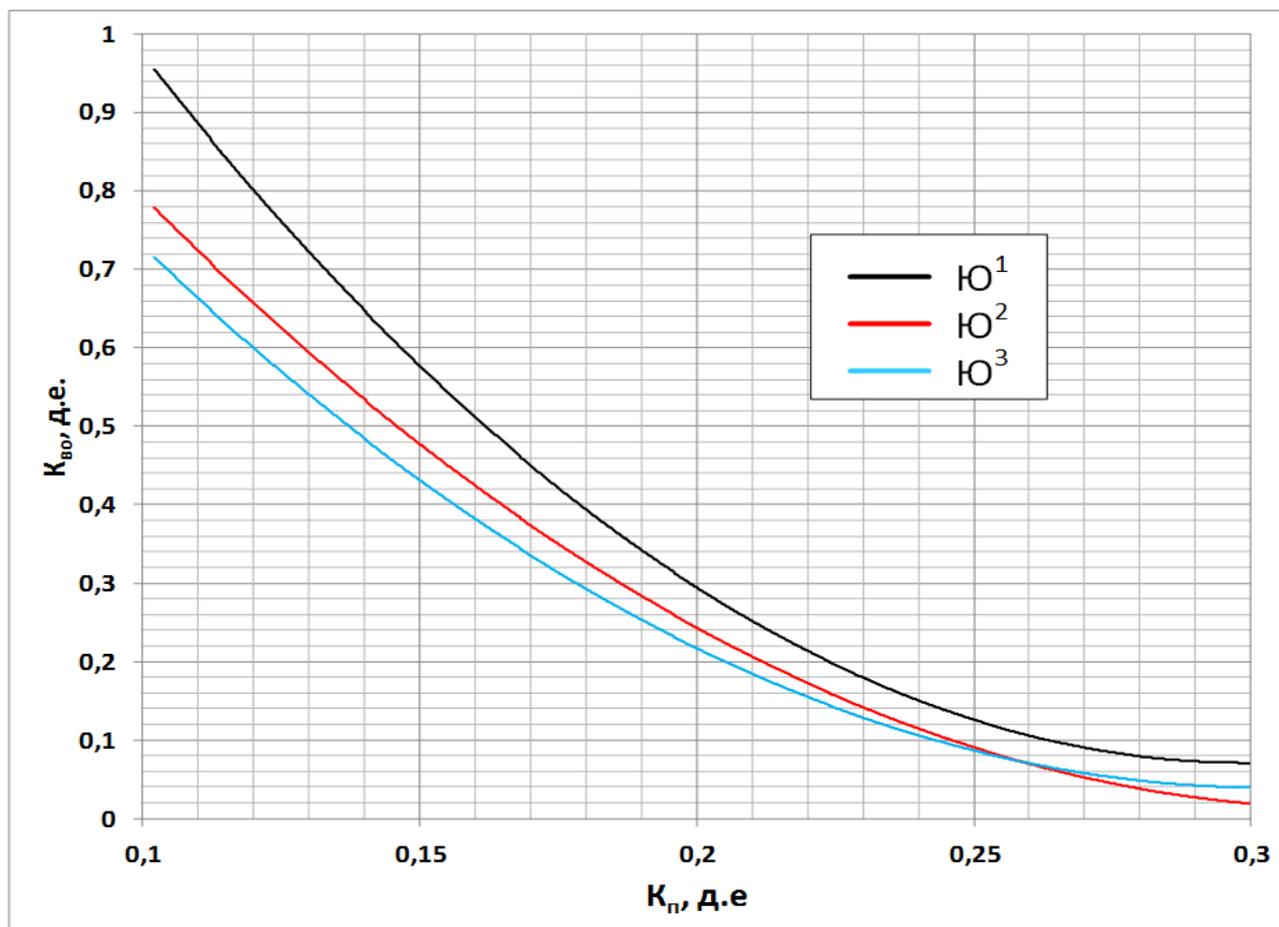


Рис. 5.2

6. Лабораторная работа №6: Определение коэффициента нефтенасыщенности продуктивного пласта по данным метода сопротивлений

Цель работы:

- 1. Построить петрофизические зависимости по результатам исследований керна;*
- 2. Определить коэффициент нефтенасыщенности продуктивного пласта по данным метода сопротивлений.*

Краткая теория

В настоящее время метод сопротивлений - основной метод ГИС, дающий информацию о параметрах K_n , K_g , $K_{нг}$ на стадии оперативной интерпретации данных ГИС в разведочных скважинах, законченных бурением, на стадии завершения разведки и подсчёта запасов и на стадии разработки месторождения в эксплуатационных необсаженных скважинах.

Метод сопротивлений используют для определения K_n , K_g , $K_{нг}$ в межзерновых терригенных коллекторах, представленных чистыми и глинистыми песчаниками и алевролитами, а также в карбонатных коллекторах с межзерновой или преимущественно межзерновой пористостью не менее 6—10%.

Коэффициент насыщения K_n , K_g или $K_{нг}$ по величине $\rho_{п}$ определяют следующим образом.

1. Определяют удельное сопротивление $\rho_{п}$ исследуемого пласта по данным БКЗ или индукционного метода.

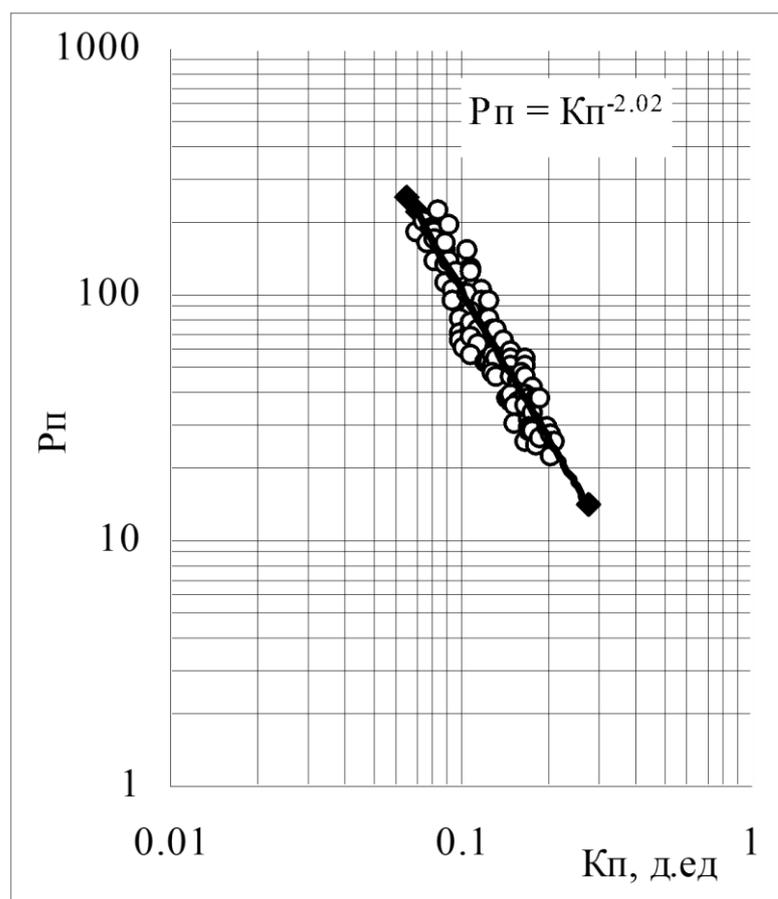


Рис. 6.1 Типизированная зависимость $P_p=f(K_p)$ для сакмаро-артинских рифовых месторождений Башкортостана

2. Устанавливают коэффициент пористости пласта K_p (например, по данным акустического каротажа). Затем, по корреляционной связи $P_p=f(K_p)$ (Рис. 6.1 Типизированная зависимость $P_p=f(K_p)$ для сакмаро-артинских рифовых месторождений Башкортостана) снимают значение параметра пористости P_p .
3. Вычисляют сопротивление водонасыщенного пласта $\rho_{вп}$ по формуле $\rho_{вп} = P_p \rho_в$, где $\rho_в$ – сопротивление воды. Если скважина пересекла пласт в водонефтяной зоне и интервал пластового пересечения содержит полностью водонасыщенную часть, величину $\rho_{вп}$ определяют непосредственно по диаграммам БКЗ или индукционного метода в этой части коллектора.
4. Рассчитывают P_n по формуле $P_n = \rho_{нп} / \rho_{вп}$ или $P_n = \rho_{гп} / \rho_{вп}$.

5. По зависимости $P_H = f(K_B)$ (Рис. 6.2 Зависимость $P_H(K_B)$ для терригенной толщи Росташи-Конновское месторождение.) для данного класса коллектора, которую получают экспериментально в лаборатории на образцах данного коллектора, находят величину K_B , соответствующую значению P_H .
6. Вычисляют параметры K_H , K_T или K_{HT} (в зависимости от фазового состояния углеводородов) как $(1 - K_B)$.

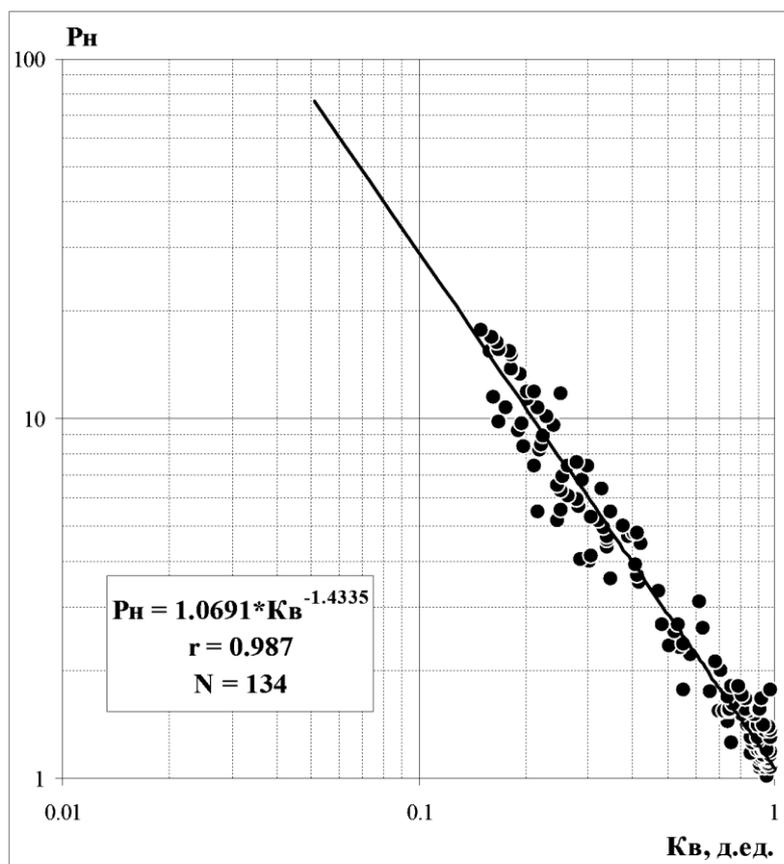


Рис. 6.2 Зависимость $P_H(K_B)$ для терригенной толщи Росташи-Конновское месторождение.

Порядок выполнения работы

1. Получить задание с значениями $\rho_{п}$, $K_{п}$, $\rho_{в}$ для исследуемого пласта и результаты исследования керна – $K_{п}$, $P_{п}$, $P_{н}$, $K_{в}$;
2. Построить зависимость $P_{п}=f(K_{п})$ по результатам исследования керна, приведенным в задании;
3. По корреляционной связи $P_{п}=f(K_{п})$ определить значение параметра пористости $P_{п}$, в зависимости от заданного коэффициент пористости продуктивного пласта $K_{п}$;
4. Вычислить сопротивление водонасыщенного пласта $\rho_{вп}$ по формуле $\rho_{вп} = P_{п} \rho_{в}$, где $\rho_{в}$ – сопротивление воды, полученное в задании.
5. Рассчитать $P_{н}$ по формуле $P_{н}=\rho_{нп}/\rho_{вп}$;
6. Построить зависимость $P_{н}=f(K_{в})$ по результатам исследования керна, приведенным в задании;
7. Определить значение $K_{в}$ по зависимости $P_{н} = f(K_{в})$ для данного класса коллектора, по рассчитанному значению $P_{н}$;
8. Вычислить параметр $K_{н}$ по формуле $K_{н}=(1 - K_{в})$.

7. Лабораторная работа № 7: Измерение магнитной восприимчивости горных пород

Цель работы:

- 1. Изучить, от чего зависит намагниченность горных пород;*
- 2. Выяснить, что такое магнитная восприимчивость горных пород и от чего она зависит;*
- 3. Ознакомится с методами исследования магнитной восприимчивости горных пород;*
- 4. Исследовать магнитную восприимчивость коллекции горных пород.*

Краткая теория

Для измерений магнитных свойств горных пород используют индукционные, магнитостатические и магнитодинамические методы измерений.

В индукционном способе измерения магнитной восприимчивости, регистрируется результат взаимодействия переменного магнитного поля с образцом горной породы.

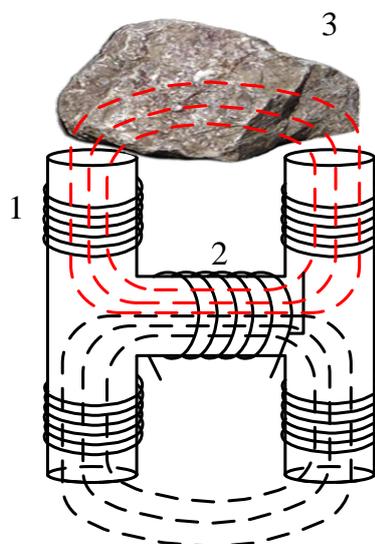


Рис. 7.1 Датчик измерителя магнитной восприимчивости прибора ИМВ-2.
1 - катушки возбуждения, 2 - измерительная катушка, 3-образец.

Таким прибором, с индукционным способом измерения, является – ИМВ-2. Чувствительный элемент датчика представляет из себя Н-образный симметричный сердечник, изготовленный из магнитомягкого сплава пермаллоя.

На сердечнике размещены четыре катушки возбуждения с одинаковыми характеристиками (число витков, шаг и плотность намотки, размеры и т.д.), соединенные последовательно. Через них пропускается переменный ток с частотой в несколько сотен герц. Магнитный поток, создаваемый верхней парой катушек, замыкается через диагональ сердечника и верхнюю часть воздушного зазора. Магнитный поток нижней пары также замыкается через диагональ и нижнюю часть воздушного зазора. В диагонали магнитные потоки направлены навстречу друг другу. При полной симметрии системы (в отсутствии образца) частные потоки равны, результирующий магнитный поток равен 0. Если к одной стороне сердечника (на рисунке верхней) поднести образец, магнитная восприимчивость которого положительна и превышает магнитную восприимчивость воздуха, то магнитное сопротивление верхнего зазора уменьшится в результате замыкания магнитного потока через образец. Магнитный поток верхней пары катушек возрастет и в диагонали сердечника появится некоторый результирующий поток, величина которого пропорциональна магнитной восприимчивости образца. Разместив на диагонали сердечника измерительную обмотку, на выходе ее получим ЭДС, пропорциональную магнитной восприимчивости образца. Эта ЭДС усиливается и регистрируется стрелочным индикатором прибора. Так как измерения косвенные (измеряется электрический сигнал), то датчик нуждается в градуировке, что осуществляется с помощью образцов с известной магнитной восприимчивостью.

Следует отметить, что результаты измерений зависят от формы и размера образцов. Для того чтобы избежать необходимости введения поправок за эти факторы следует использовать образцы объемом не менее 200 см³ с ровными поверхностями, полностью перекрывающими площадь датчика.

При изготовлении датчика трудно добиться идеальной симметрии системы. Поэтому предусмотрена подстройка симметричности датчика (нулевой отсчет без образца) с помощью небольшого ферритового сердечника, размещенного с нижней стороны датчика. Кроме того, имеется латунный сердечник (также с нижней стороны) для уменьшения влияния вихревых токов, которые могут возникать в образцах с высокой электропроводностью.

ПОРЯДОК РАБОТЫ С ПРИБОРОМ ИМВ-2

1. Включаем тумблер "Сеть".

2. В положении переключателя чувствительности "0" вращением регулятора "устан.0" устанавливаем стрелку прибора в нулевое положение. Как правило, эта операция выполняется один раз в рабочий день.

3. В положении переключателя чувствительности 1 с помощью ферритового стержня устанавливаем стрелку на 0 (при вращении регулировочных стержней пользуйтесь немагнитными и неэлектропроводными отвертками).

4. Проверяем положение нуля в положениях 10, 10^2 и т.д. переключателя чувствительности. Ноль не должен смещаться. Если это происходит, проводят дополнительную регулировку. Методом последовательных приближений каждый раз половину смещения устраняют латунным, половину – ферритовым стержнем.

В образцах приборов с длительным сроком эксплуатации наблюдается частый уход нуля в небольших пределах. Для ускорения установки нуля допускается использование небольшого магнитного образца на столе под датчиком и компенсация смещения нуля посредством перемещения этого образца.

5. Переключателем чувствительности устанавливаем диапазон, соответствующий магнитной восприимчивости рабочего эталона. Помещаем на датчик рабочий эталон. При необходимости регулятором "калибр." устанавливаем отсчет равным магнитной восприимчивости эталона. Убираем

эталон, проверяем нуль прибора, в случае смещения повторяем п.4 и проводим повторную калибровку.

6. Размещаем на датчике изучаемый образец, устанавливаем нужный предел чувствительности, берем отсчет магнитной восприимчивости образца. Каждый образец измеряем по 3-м поверхностям, используя ровные грани, полностью перекрывающие поверхность датчика.

ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ. Размещайте на датчике эталоны и образцы аккуратно. При ударах возможно смещение нуля. Перед началом любого измерения убедитесь в отсутствии смещения нуля, периодически проверяйте калибровку и при необходимости подправляйте ее.

Результаты измерений заносятся в журнал.

ЖУРНАЛ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Прибор № Дата Группа Бригада
Состав бригады
Коллекция

№	№ обр.	Название	$\mathcal{H}_1 \cdot 10^5$ ед. СИ	$\mathcal{H}_2 \cdot 10^5$ ед. СИ	$\mathcal{H}_3 \cdot 10^5$ ед. СИ	$\mathcal{H}_{\text{ср}} \cdot 10^5$ ед. СИ	$\mathcal{H}_{\text{испр}} \cdot 10^5$ ед. СИ
...	ЖЕЛЕЗНЫЕ РУДЫ Осадочные	
2 8	91П	Табачная руда	48	56	52	52	

Замечание. При измерении образцов с высокой магнитной восприимчивостью ($\mathcal{H} > 50000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) на результаты сказывается действие внутреннего размагничивающего поля, и измеренная величина является "кажущейся". Для получения истинного результата необходимо осуществлять калибровку эталоном с близким значением магнитной восприимчивости, либо вычислять ее по приближенному выражению:

$$\mathcal{H}_{\text{испр}} = \mathcal{H}_{\text{изм}} / (1 - 0,3 \cdot \mathcal{H}_{\text{изм}}),$$

где $\mathcal{H}_{\text{изм}}$ – измеренное значение магнитной восприимчивости.

8. Лабораторная работа № 8: Измерение удельного электрического сопротивления (УЭС) образцов горных пород.

Цель работы:

- 1. Изучить, что такое удельное электрическое сопротивление (УЭС);*
- 2. Выяснить какой формой проводимости определяется, в основном, УЭС горных пород;*
- 3. Ознакомиться с величиной УЭС основных породообразующих минералов и некоторых горных пород;*
- 4. Научиться самостоятельно определять УЭС образцов горных пород правильной формы 2х и 4х электродными методами;*
- 5. Выяснить зависимость между УЭС и структурой порового пространства.*

Краткая теория

УЭС – это параметр, характеризующий способность среды проводить электрический ток. Он проявляется как коэффициент пропорциональности в законе Ома для линейных проводников, в соответствии с которым сопротивление проводника (R) прямо пропорционально его длине (L) и обратно пропорционально площади поперечного сечения (S):

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1).$$

Коэффициент пропорциональности ρ , называется удельным электрическим сопротивлением среды. Его размерность в СИ: Ом*м, единица – 1 Ом*м.

Некоторое представление о УЭС (в Ом*м) минералов дает следующая таблица:

Таблица 8.1

Минералы	ρ , Ом·м	Минералы	ρ , Ом·м
Сульфиды (халькопирит, пентландит, пирит и др.)	$10^{-5}-10^{-1}$	Кварц	$10^{12}-10^{14}$
Магнетит	$10^{-2}-10^1$	Кальцит	10^9-10^{12}
Графит	$10^{-5}-10^{-1}$	Полевые шпаты	$10^{10}-10^{13}$
Природные воды	$10^{-2}-10^3$	Слюды	$10^{12}-10^{15}$
Нефть	10^8-10^{15}	Хлориды (галит, сильвин)	$10^{10}-10^{14}$

УЭС горных пород в зависимости от состава, структуры, пористости, характера заполнения пор лежит в пределах $10^{-1}-10^9$ Ом·м. Для большинства осадочных, магматических и метаморфических пород проводимость обусловлена присутствием поровой воды. В этом случае УЭС описывается выражением:

$$\rho = P_{\text{п}} \cdot \rho_0, \quad (2)$$

где ρ - УЭС водонасыщенной породы, $P_{\text{п}}$ - параметр пористости, ρ_0 - УЭС поровых вод.

Для малоглинистых осадочных пород параметр пористости описывается формулой В.Н.Дахнова:

$$P_{\text{п}} = \frac{a_{\text{п}}}{k_{\text{п}}^m} \quad (3)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент открытой пористости, $a_{\text{п}}$ – коэффициент, зависящий от литологии (меняется от 0,5 до 1), m -структурный показатель, зависящий от степени цементации породы (меняется от 1,3 до 2,3).

Измерение УЭС образцов правильной формы

Для образцов правильной геометрической формы (цилиндр, параллелепипед), в основном, используют 2-х и 4-х электродные методы.

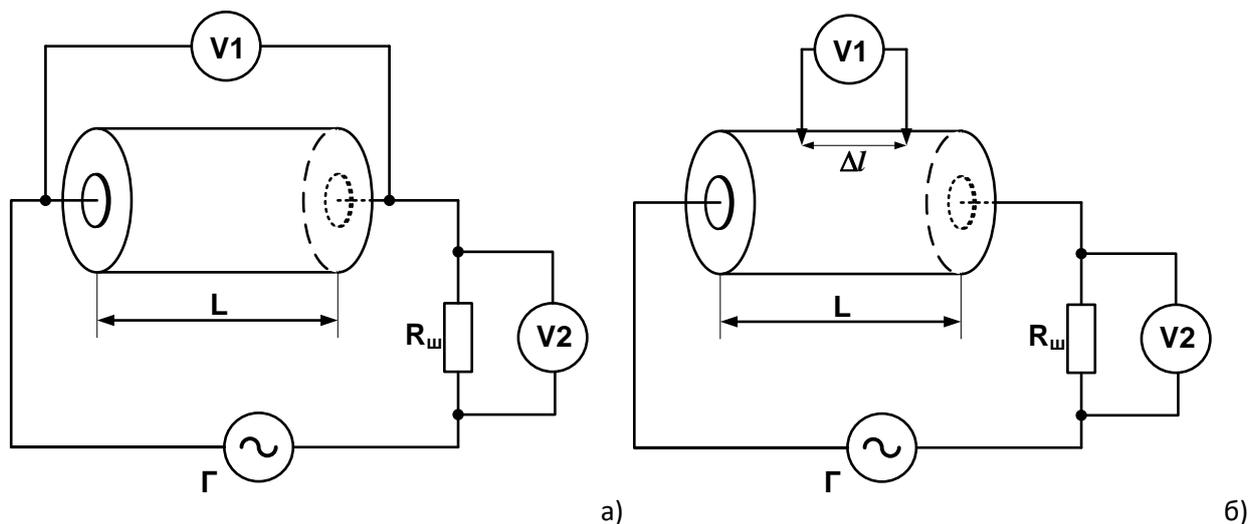


Рис. 8.1 Измерение удельного электрического сопротивления, а) двухэлектродным методом, б) четырехэлектродным методом

Принципиальные схемы измерений приведены на Рис. 8.1 Измерение удельного электрического сопротивления, а) двухэлектродным методом, б) четырехэлектродным методом. Для измерения силы тока в цепь последовательно включен шунт. Его сопротивление равно 1 кОм, поэтому падение напряжения на нем, измеренное в вольтах, соответствует току в миллиамперах.

Расчет УЭС в 2-х электродном методе ведется по формуле:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} * \frac{S}{L}, \quad (4)$$

где S и L – площадь поперечного сечения и длина образца, ΔU и I – падение напряжения на торцах образца и ток в цепи.

Расчет УЭС в 4-х электродном методе ведется по формуле:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} * \frac{S}{\Delta l}, \quad (5)$$

где S- площадь поперечного сечения, Δl расстояние между измерительными электродами.

Каждый способ имеет свои недостатки. Между токовыми электродами 2-х электродной установки и образцом возникает переходное сопротивление, которое складывается с сопротивлением образца и рассчитанное УЭС оказывается завышенным. Особенно сильно это проявляется при измерении высокоомных образцов. Это явление принципиально неустранимо и практически не поддается оценке. Минимизация переходного сопротивления достигается

тщательной обработкой (шлифовкой) торцов и плотным прижиманием токовых электродов к торцам образца.

Между измерительными электродами 4-х электродной установки и образцом также имеется переходное сопротивление, которое будет включено последовательно с внутренним сопротивлением вольтметра. В результате, показания вольтметра будут занижены на величину падения напряжения на переходном сопротивлении. Расчетные значения УЭС (см. формулу 5) также будут занижены. Влияние переходного сопротивления может быть минимизировано путем использования вольтметров с высоким внутренним сопротивлением.

Задание

1) Провести измерение образцов с 2-х и 4-х электродными установками. Данные занести в журнал. Рассчитать УЭС.

2) Провести контрольные измерения. Рассчитать случайную абсолютную погрешность с каждой установкой и систематическое расхождение между ними.

3) Используя формулы 2 и 3, рассчитать коэффициент пористости образцов (необходимые параметры взять у преподавателя).

9. Лабораторная работа № 9: Измерение плотности горных пород

Цель работы:

1. *Ознакомиться с определением плотности горных пород;*
2. *Выяснить, как влияют на плотность условия образования и состав горных пород;*
3. *Ознакомиться с методами определения плотности горных пород;*
4. *Исследовать плотность коллекции образцов горных пород.*

Краткая теория

Плотностью горной породы σ называют массу M , приходящуюся на единицу объема породы V :

$$\sigma = M/V$$

В системе СИ плотность выражается в $\text{кг}/\text{м}^3$, в системе СГС - в $\text{г}/\text{см}^3$. Между ними существует следующее соотношение: $1 \text{ г}/\text{см}^3 = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$. В петрофизике принято пользоваться единицами СГС.

Горные породы состоят из минерального скелета и пор, заполненных жидкостью и газом. Соответственно, принято выделять следующие разновидности плотности:

а) минеральную плотность, представляющую собой отношение массы твердой фазы породы к объему твердой фазы - $\sigma_m = M_T/V_T$;

б) плотность водонасыщенной породы σ_v – отношение массы горной породы с максимальной влажностью к полному объему породы;

в) плотность сухой породы σ_c - отношение массы твердой фазы к полному объему породы, в порах которой отсутствует влага.

Знание плотности пород и руд необходимо при проведении гравиразведочных и сейсмических исследований, при постановке методов ядерной геофизики, для выяснения условий осадконакопления и истории формирования тектоники площадей и в ряде других случаев.

Плотность может быть измерена в естественном залегании, в том числе в скважинах, методами ядерной геофизики. При работе с образцами обычно определяется плотность сухой породы, так как трудно обеспечить сохранность естественной влажности и нефтегазонасыщенности. Масса образца находится взвешиванием, объем может быть определен по размерам образца правильной формы либо методом гидростатического взвешивания.

Метод гидростатического взвешивания сводится к двойному взвешиванию исследуемого образца горной породы. Вначале определяют вес образца в воздухе $P_{\text{возд}} = M \cdot g$, где g – ускорение свободного падения. Затем, подвесив образец к дужке технических весов, погружают его в сосуд с водой и находят новое значение веса – $P_{\text{вод}}$. Разность этих величин равна весу воды, вытесненной образцом:

$$P_{\text{возд}} - P_{\text{вод}} = \sigma_0 \cdot V \cdot g,$$

где $\sigma_0 = 1 \text{ г/см}^3$ – плотность воды.

Следовательно, при полном погружении образца его объем может быть найден как $V = \frac{P_{\text{возд}} - P_{\text{вод}}}{g \cdot \sigma_0}$.

$$\text{Окончательно имеем: } \sigma = \sigma_0 \cdot \frac{P_{\text{возд}}}{P_{\text{возд}} - P_{\text{вод}}}$$

Чтобы предотвратить попадание воды в поры породы, высушенные образцы парафинируют. Для плотных образцов парафинирование необязательно.

Работа с петрографической коллекцией

Исследование коллекции проводится как с целью освоения методики измерения плотности, так и для изучения основных закономерностей плотностных свойств горных пород в зависимости от их состава и условий формирования. Чтобы избежать дополнительной работы по систематизации

результатов измерений, образцы на столе расположены в определенном порядке, который не следует изменять: каждый образец после выполнения измерений должен быть возвращен на прежнее место. Последовательность измерений указывается преподавателем. Перед началом измерений на развернутом тетрадном листе заготавливается таблица по форме 1, приведенной ниже.

Таблица 9.1

Журнал измерения плотности
пород петрографической коллекции

№ п/п	№ обр	$P_{\text{возд}}$, Г	$P_{\text{вод}}$, Г	$P_{\text{возд}} - P_{\text{вод}}$, Г	σ , г/см ³	Название породы	Классификация
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
3							
4							
5							
6							
...							

Перед началом измерений нужно установить весы по уровню и с помощью дополнительных грузиков добиться нулевого положения стрелки. Помещая на чашку весов гири весом 100 и 200 г, убедиться в правильности работы весов.

Измерения следует выполнять в следующем порядке:

1. Записать в таблицу номер образца и визуально определить название породы или хотя бы группы, к которой он принадлежит. Правильность определения контролируется по каталогу.

2. Взвесить образец в воздухе, положив его на чашку весов, а затем зацепить петлей и определить вес в воде. Результаты записать в таблицу.

3. Не возвращая образец на место, рассчитать плотность и сопоставить полученный результат с ожидаемым значением плотности для данной породы. В случае несоответствия полученного значения с ожидаемым следует выяснить причину расхождений. Это может быть ошибка в расчете, в измерении либо в определении горной породы. Только после этого можно переходить к следующему образцу.

Когда все измерения будут закончены, следует заполнить колонку классификации, ориентируясь на каталог. Наиболее крупные ступени (изверженные, осадочные и т.д.) расположить в самой правой колонке, слева - более дробные. Максимальное число ступеней классификации – четыре. Анализ результатов исследования коллекции с описанием основных закономерностей плотностных характеристик горных пород и руд должен содержаться в каждом отчете.

Оценка погрешности измерений

Погрешность измерений определяется по данным внутреннего или внешнего контроля. В качестве внешних контрольных измерений используются результаты измерений, выполненных другой половиной бригады.

Поскольку диапазон вариаций плотности горных пород и руд сравнительно невелик, абсолютная погрешность для всего диапазона остаётся постоянной и наилучшим образом отражает качество измерений. Для её вычисления составляется таблица по форме 2, в которую заносятся все результаты контрольных измерений. Если результаты основного (σ_1) и контрольного (σ_2) измерений отличаются более, чем на $0,08 \text{ г/см}^3$, это свидетельствует о наличии грубой ошибки, и они не должны приниматься во внимание при расчете погрешности.

Мерой случайной погрешности служит средняя квадратическая погрешность. При двойных измерениях вычисление абсолютной средней квадратической погрешности единичного измерения производится по формуле:

$$\Delta\sigma_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{1i} - \sigma_{2i})^2}{2n}}$$

где n – число контрольных измерений, i – порядковый номер образца.

Систематическая погрешность может быть обнаружена только по результатам внешнего контроля и рассчитывается по формуле

$$\Delta\sigma_{\text{сист}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{1i} - \sigma_{2i})}{n}$$

Расчет погрешностей удобно производить, используя следующую таблицу:

Таблица 9.2

Таблица обработки контрольных измерений
методом гидростатического взвешивания
Внешний контроль

№ п/п	№ обр.	σ_{1i} , Г/см ³	σ_{2i} , Г/см ³	$(\sigma_{i1}-\sigma_{i2})$, Г/см ³	$(\sigma_{i1}-\sigma_{i2})^2$, (Г/см ³) ²
1	2	3	4	5	6
1	4	2,62	2,64	-2	4
2	6	2,98	2,94	4	16
...
				Σ	Σ

В последней строке вычисляются суммы по колонкам 5 и 6, которые подставляются в приведенные выше формулы для расчета систематической (только при внешнем контроле) и случайной погрешности. Так как для упрощения расчетов в колонках 5 и 6 таблицы записаны величины соответственно в 100 и 10000 раз большие разности значений и её квадрата, это необходимо учитывать при подстановке сумм в соответствующие формулы.

Измерение плотности денситометром

Разновидностью метода гидростатического взвешивания является измерение плотности образцов с помощью денситометра (Рис. 9.1 Устройство денситометра: 1) серьга с нитью для образца, 2) балансировочные грузы, 3) балансировочные винты, 4) серьга с подвесом для гирь, 5) сосуд с водой.). Денситометр представляет собой специализированные циферблатные весы. Если, подвесив образец к одному из плеч коромысла, уравновесить весы, а затем погрузить образец в воду, новое положение равновесия оказывается зависящим только от плотности образца, но не от его массы. Это дает возможность проградуировать шкалу в единицах плотности и брать непосредственный отсчет.

Для измерения плотности образец подвешивается за петлю к правому плечу коромысла. С помощью гирь и дробинки система уравновешивается так,

чтобы стрелка встала на средний штрих индекса “И” в правой части циферблата. Затем под образец подводится сосуд с водой 5, и с помощью подъемного устройства обеспечивается полное погружение образца в воду. Система устанавливается в новое положение равновесия, зависящее от плотности образца, которую можно считать по шкале прибора.

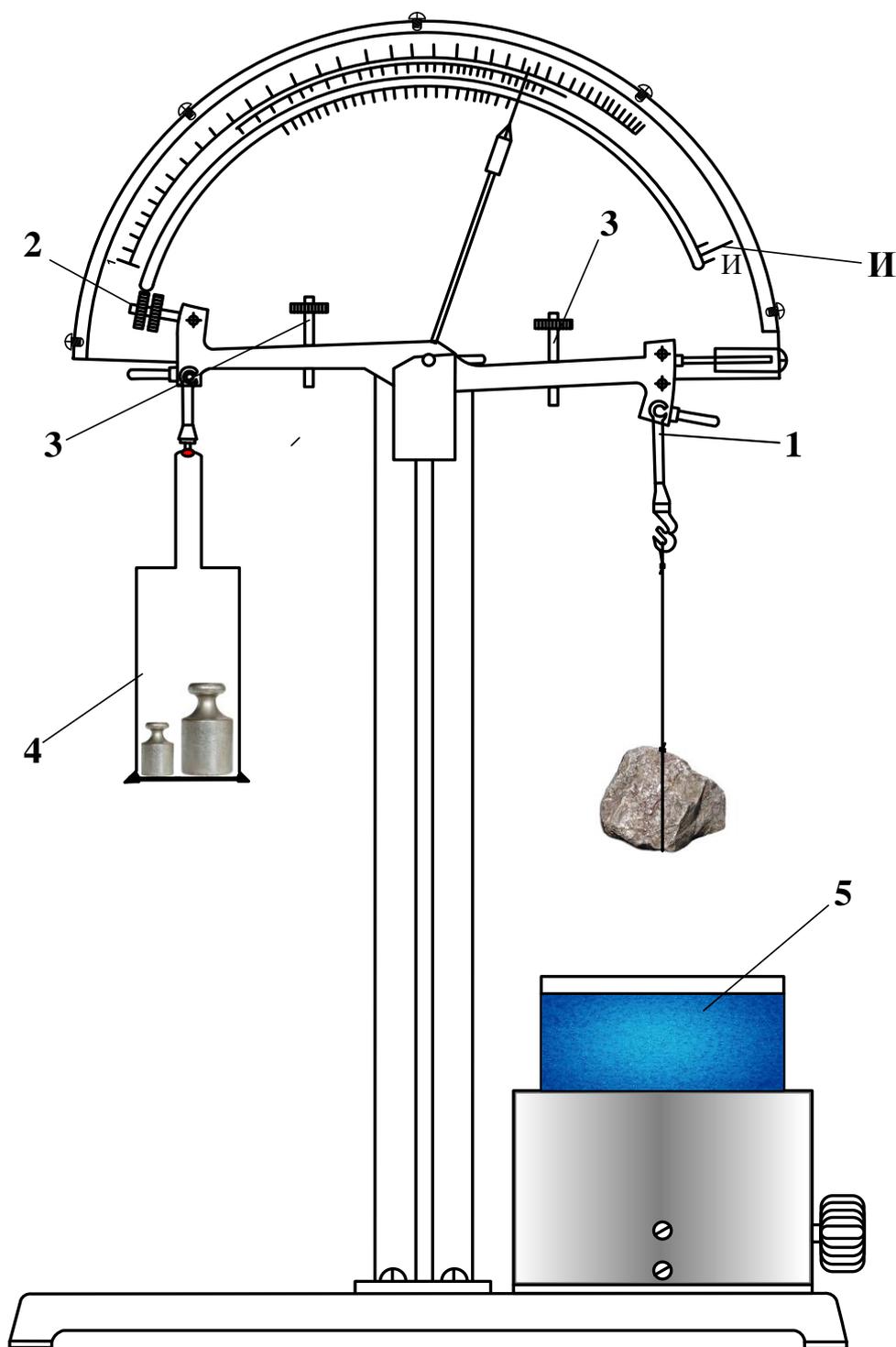


Рис. 9.1 Устройство денситометра: 1) серга с нитью для образца, 2) балансировочные грузы, 3) балансировочные винты, 4) серга с подвесом для гирь, 5) сосуд с водой.

Положение равновесия при погружении образца в воду зависит не только от плотности, но и от угла, образованного линиями между осью вращения коромысла и точками подвеса серег. Если этот угол отличается от стандартного, например, в результате допущенной погрешности при сверлении отверстий для осей, денситометр будет давать систематическую погрешность. Поэтому перед началом работы с денситометром необходимо поверить его шкалу.

Настройка и поверка денситометра

Первый этап работы заключается в настройке денситометра. Настройка проводится в следующей последовательности:

1. Денситометр устанавливается так, чтобы ось вращения была горизонтальна, на правое плечо коромысла навешивается серьга 1 с нитью для образца.

2. С помощью балансировочных грузиков добиваются безразличного положения равновесия коромысла. Если центр тяжести системы совпадает с осью вращения коромысла, последнее в любом положении будет оставаться неподвижным; в противном случае система стремится повернуться так, чтобы центр тяжести находился прямо под осью. Перемещение центра тяжести вдоль коромысла осуществляют грузиками 2, в перпендикулярном направлении – винтами 3. Проверка равновесия производится при горизонтальном положении коромысла, при наклоне влево и при наклоне вправо.

3. На левое плечо коромысла навешивают серьгу с подвесом для гирь 4 и на подвес устанавливают гирьку массой 100 г. Затем нивелировочными винтами, расположенными за циферблатом, поворачивают последний так, чтобы стрелка установилась на деление “1”. При установке стрелка и её отражение в зеркале должны совмещаться. На этом настройка заканчивается.

После проверки преподавателем правильности настройки следует провести поверку шкалы денситометра. Поверка выполняется с помощью разновесов. Для этого вместо образца к правому плечу коромысла подвешивается гирька весом P_0 и производится уравновешивание системы так, чтобы стрелка установилась на индекс. Затем, не снимая груза на левом подвесе,

заменяют гирьку на более легкую весом P_1 . Это эквивалентно изменению веса образца, погруженного в воду, при условии, что его объем равен:

$$V = \frac{P_0 - P_1}{\delta_0},$$

где δ_0 – удельный вес воды. Следовательно, новое положение равновесия будет соответствовать плотности образца, рассчитываемой по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \frac{P_0}{P_0 - P_1}.$$

Сравнивая теоретическое значение плотности с показаниями денситометра, можно определить погрешность шкалы и величину поправки.

Поверку следует выполнить для точек 2,00 г/см³, 2,50 г/см³ и 3,33 г/см³. В качестве начального веса берется гирька с $P_0 = 100$ г, вес гирек для поверки указанных делений шкалы вычисляется, исходя из приведенной выше формулы. Результаты поверки заносятся в таблицу 9.3. При взятии отсчета следите за тем, чтобы стрелка и её отражение совпадали. Отсчет следует брать с точностью до тысячных, интерполируя между делениями.

Таблица 9.3

Таблица поверки денситометра № ...

$P_0 = 100$ г

$\sigma_{\text{расч}}, \text{Г/см}^3$	$\sigma_{\text{изм}}, \text{Г/см}^3$	$P_0 - P_1, \text{Г}$	$P_1, \text{Г}$
2,00			
2,50			
3,33			

После окончания поверки следует провести измерение плотности 2 – 3 образцов и записать результаты измерений в журнал, указав название породы.

Объем работы и отчетность

Каждой бригадой выполняются следующие виды работ:

определение плотности образцов, представленных в петрографической коллекции, методом гидростатического взвешивания (порядка 20 образцов);

обработка контрольных измерений и вычисление погрешностей;

работа с денситометром, включающая его настройку, поверку и проведение измерений плотности образцов.

На бригаду представляются следующие материалы:

- журналы измерений плотности коллекции пород и руд (2 на бригаду);
- таблица обработки результатов контрольных измерений методом гидростатического взвешивания (внешний контроль);
- таблицы поверки денситометров (2 на бригаду);
- таблицы результатов измерений на денситометре (2 на бригаду).

Отчеты представляются каждым индивидуально. В отчете должны быть отражены:

- методика измерений плотности методом гидростатического взвешивания, включая оценку погрешностей;
- анализ результатов определения плотности пород и руд коллекции, где следует проследить закономерности распределения плотности в зависимости от состава и условий образования горных пород, сопоставляя полученные результаты с лекционным материалом;
- методика измерений плотности на денситометре, включая его подготовку, поверку и результаты измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.М. Добрынин, В.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. Петрофизика (Физика горных пород). Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. под редакцией доктора физико-математических наук Д.А. Кожевникова -М. ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им И.М. Губкина, 2004 г., 368 с
2. И.И.Бреднев Петрофизика, ч.1. Изд. УГГА, 2000г.
3. И.И.Бреднев Петрофизика, ч.2. Изд. УГГА, 2000г.

Учебное издание

Земцов Н.С., Игумнов С.А., Бреднев И.И.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Учебно-методическое пособие

к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Физика горных пород» для студентов специальности 130102 – "Технологии геологической разведки"

Корректурa кафедры геофизики
Компьютерная верстка Земцов Н.С.

Подписано в печать __.__.2016 г.
Бумага писчая. Формат **60 x 84 1/16**.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. **2,0**. Уч.-изд. л. **1,86**. Тираж **50**. Заказ **19**

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ