

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ТЕПЛОВЫМИ И УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ ГОРНЫХ ПОРОД

В статье рассматривается связь геотермических градиентов со скоростью распространения сейсмических волн. На экспериментальном материале показана справедливость кинетического уравнения, связывающего теплопроводность и квадрат скорости звука для пористых горных пород.

1. Введение

Надежный прогноз температурных условий на большие глубины, недоступные бурению, возможен при точном знании определенных физических параметров, в частности, коэффициента теплопроводности λ . Оценки теплопроводности земной коры базируются, в основном, на лабораторном эксперименте. Непосредственно в естественных условиях теплопроводность горных пород не измеряется, поэтому разрабатываются методы ее определения из других геофизических данных.

2. Корреляция геотермических градиентов со скоростью сейсмических волн

Экспериментальные данные показывают, что существует обратная зависимость между двумя параметрами, характеризующими упругие и тепловые свойства литосферы, рис. 1–5. Это скорость распространения сейсмических волн V и градиент температуры Γ , пропорциональный теплопроводности горных пород λ согласно уравнению Фурье $q = \lambda \Gamma$, где q – тепловой поток из недр.

Для выявления корреляционных зависимостей были использованы значения термоградиентов, которые определялись с высокой точностью (0.01 %) из температурных измерений, выполненных нами в глубоких скважинах с установившимся тепловым режимом на территории Восточно-Европейской и Скифской платформ.

Кроме того, для установления корреляции использованы фактические данные сейсмокоротаж скважин,

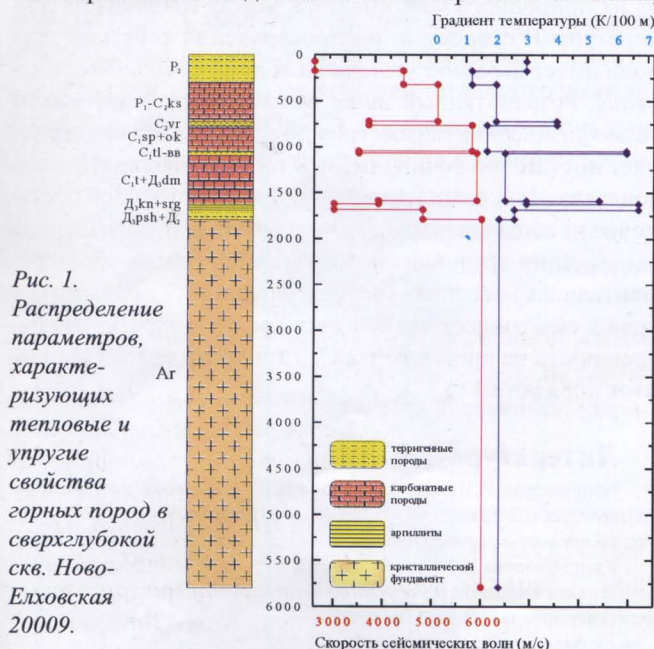


Рис. 1. Распределение параметров, характеризующих тепловые и упругие свойства горных пород в сверхглубокой скв. Ново-Елховская 20009.

собранные в фондах геофизических трестов – 1180 колонок пластовых скоростей распространения сейсмических волн по 640 площадям Восточно-Европейского региона.

Некоторые типичные для изученных регионов колонки V и Γ приведены на рисунках 1–4.

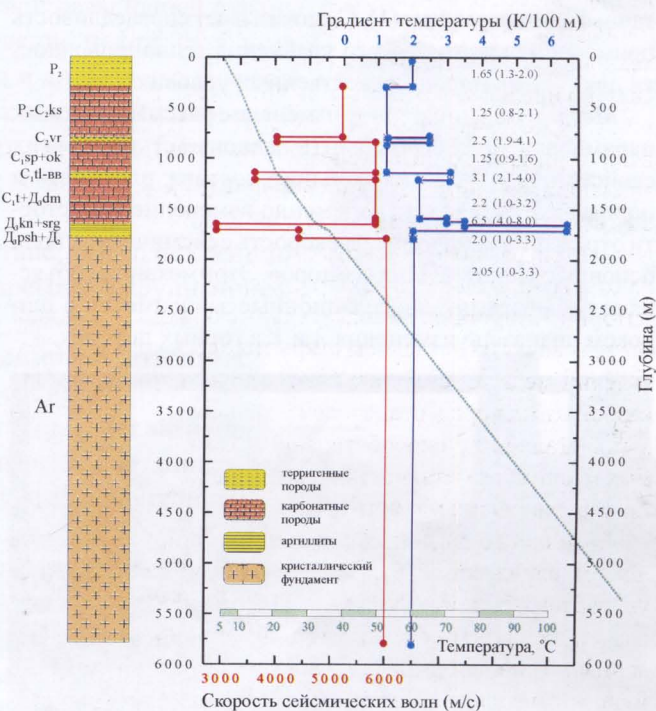


Рис. 2. Обобщенная термограмма и характерное распределение параметров для Южного купола Татарского свода, показывающее связь тепловых и упругих свойств горных пород в условиях их естественного залегания.

3. Теория

Корреляционный анализ экспериментального материала показывает справедливость теоретического описания переноса тепла в горных породах посредством кинетического выражения для установившейся теплопроводности:

$$\lambda = \frac{1}{3} c \rho \tau V^2 \quad (1)$$

где c – теплоемкость, ρ – плотность, τ – время релаксации фононов (Христофорова, 1988).

Четкие графики зависимостей

$$\frac{\lambda}{q} = \frac{1}{\Gamma} = f(V^2) \quad \text{и} \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} = f\left(\frac{V_1^2}{V_2^2}\right) \quad (2)$$

были получены для карбонатных и терригенных толщ, рис. 5. Они аппроксимируются линейными функциями с

коэффициентами корреляции 0.6 – 0.98 и индексом детерминации 0.6 – 0.84. Проверка графиков на нелинейность корреляции подтвердила квадратичный вид зависимости между λ и V для горных пород (Непримеров и Христофорова, 1983).

Для горизонтов, где кондуктивный тепловой режим дополняется конвективным теплопереносом, получены кривые, которые описываются формулой, выведенной при учете влияния движущегося флюида в порках:

$$\lambda = \frac{q}{\Gamma} = \frac{1}{3} c \rho \tau V^2 + c_1 \rho_1 \omega \Delta H \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

где c_1 , ρ_1 – теплоемкость и плотность жидкости, ω – скорость движения флюида, ΔH – толщина пласта, α – угол наклона пласта; или

$$\frac{\lambda}{q} = \frac{1}{\Gamma} = aV^2 + b \quad (4)$$

Сравнение эмпирических зависимостей (2) с рассчитанными по формулам (1), (3) доказывает справедливость применения кинетического уравнения теплопроводности для горных пород в естественных условиях.

Механизм. Синхронное изменение рассматриваемых параметров можно объяснить зависимостью упругих свойств породы от минерального состава, плотности и пористости. Как известно, именно изменение пористости отражает воздействие на скорость сейсмических волн основных уплотняющих факторов. Этот механизм объясняет наблюдаемые корреляционные зависимости в широком диапазоне изменения λ и V в горных породах.

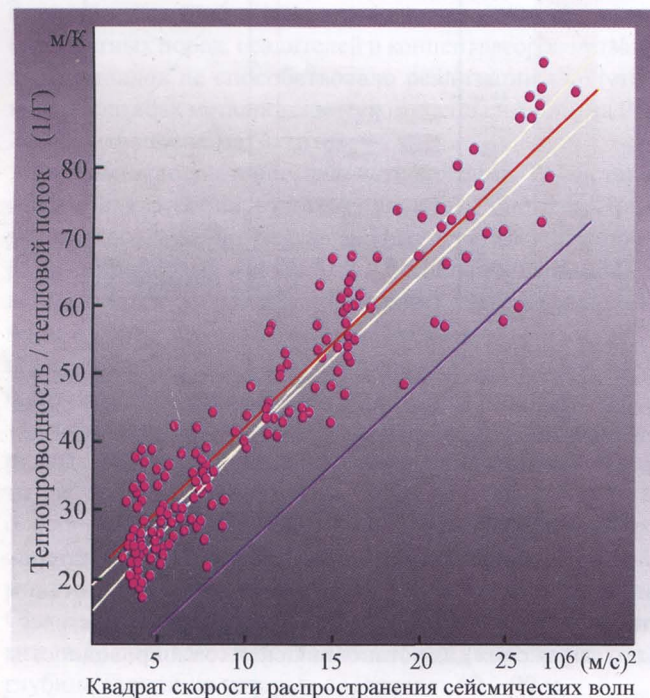


Рис. 5. Экспериментальная зависимость между тепловыми и упругими свойствами горных пород в интервале глубин 200 – 1000 м. Для построения графика использованы значения геотермических градиентов, измеренные в скважинах Волго-Уральской антеклизы, Московской синеклизы, Прикаспийской впадины, Предкавказья и Донбасса. Значения скорости V взяты в фондах соответствующих геофизических трестов. Светлые линии – прямые регрессии; синяя линия – теоретическая прямая, ф-ла (1); красная линия – теоретическая прямая с учетом влияния движущегося флюида, ф-лы (3-4).

Рис. 3. Геолого-геотермический разрез скв. Черемшанская 20015. Западный склон Татарского свода. (На данном графике градиента направлена в обратную сторону).

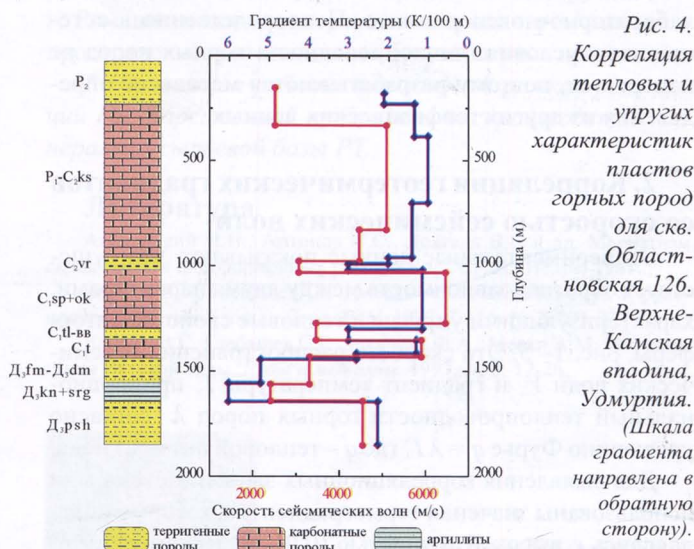
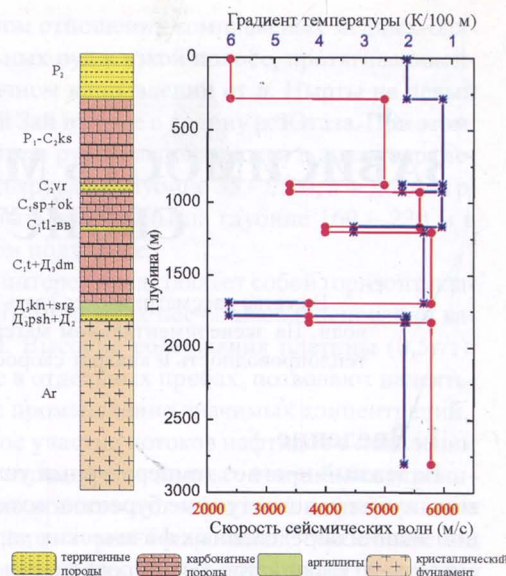


Рис. 4. Корреляция тепловых и упругих характеристик пластов горных пород для скв. Областная 126. Верхне-Камская впадина, Удмуртия. (Шкала градиента направлена в обратную сторону).

Заключение

Выявленная корреляционная зависимость между тепловыми и упругими свойствами горных пород в условиях их природного залегания, т.е. между градиентом температуры и скоростью распространения сейсмических волн имеет большое значение для практического применения. Разработанный на ее основе метод определения теплофизических параметров по сейсмокаротажу позволяет достаточно точно оценить теплопроводность пластов и крупных толщ горных пород в естественной обстановке и, соответственно, использовать эти значения для вычисления теплового потока из недр Земли. Экспериментальная косвенная (через температуру) проверка метода в скважинах показала, что среднеквадратичная погрешность не превышает 2°C, а точность метода составляет порядка $\pm 5\%$.

Литература

Непримеров Н.Н., Христофорова Н.Н. К вопросу о корреляции геотермических градиентов со скоростью сейсмических волн. *Физические процессы горного производства*. Л.: Изд-во ЛГИ. 1983. 89-93.
Христофорова Н.Н. Теоретическое и экспериментальное обоснование связи тепловых и упругих свойств горных пород в условиях их естественного залегания. *Тепловые расчеты процессов и устройств в горном деле Севера*. Якутск. 1987. 54-57.