

Prof. geol. Jaroslav U h l í k , VÚHU :

TERMOMETRIE PRO MALÉ HLUBKY

Úvod

Termometrické měření ve vrtech je již běžnou samostatnou metodou užitou geofyziky buď jako obor zjišťování tepelných gradientů nebo jako submetoda karotážního neb hydrogeologického průzkumu. Nejinak je tomu s měřením teplot bezprostředně pod povrchem. Měření podpovrchových teplot je zase subobor pedologie a ve srovnání s termometrií pro malé hloubky má zcela jiné úkoly a tím i interpretační parametry. Mezi shora zmíněnou "hlubinnou" termometrií a půdní termometrií je poměrně málo známý a tím i poměrně málo rozvitý obor aplikované geofyziky : Termometrie podpovrchové zóny. Tento obor řeší otázky nehlubokých hydrogeologických problémů, mělce uložených skrytých zvodnělých zlomů, možnosti lokace výchozů hnědého uhlí, pyritů apod. Nejslibnější jsou práce týkající se lokalizace důlních požárů právě v blízkosti výchozů uhelné sloje.

Od hlubinné termometrie - vrtné termokarotáže se popisovaná metoda ostře liší tím, že se tato metoda zabývá hloubkami v zóně tepelných přechodů a tím nutně vyžaduje zavedení jiných korekcí a zároveň jiného postupu měření. Druhy korekcí, postup a použití korekcí při podpovrchové termometrii je účelem tohoto článku.

Obor hloubek podpovrchových tepelných zón

Při definování naší zájmové oblasti vycházíme z pojmu tepelných zón. Rozdělili jsme zóny podle vlivu lineárního tepelného zdroje, které se šíří homogenní izotropickou Zemí. Hranice jsou pak dány diferenčním rozsahem teplot v zmíněné zóně. Konvenčně uvažujeme tyto zdroje : sluneční záření, přirozené teplo Země a umělý zdroj tepla pod povrchem. I když lze teoreticky rozdělit naši zájmovou oblast na zmíněné zóny, hloubkové údaje udané v konkrétních metrech jsou ryze empirické a závisí na lokalitě měřeného území.

Rozdělení zón

- a) zóna povrchových teplot se pohybuje v rozmezí několika cm až desítek centimetrů pod úrovní terénu. Je to zóna vystavená bezprostředním změnám sluneč-

ního záření a jiných povětrnostních vlivů a při požadavku přesnosti měření na $\pm 0,1^\circ \text{C}$ nelze v této zóně provádět měření. Tato oblast je právě oborem zmíněné pedologie;

- b) zóna proměnných teplot počíná od spodní hranice zóny povrchových teplot. Je to zóna, ve které obvykle provádíme měření. Vliv denní tepelné periody je zde značný, zejména v malých hloubkách, ale kolísání tepelné vlny je zákonité a hlavně pomalé. Tím lze již zavést předem vypočítanou korekci (viz teoretickou část článku). Korekce v rozpětí $\pm 0,1$ až $0,05^\circ \text{C}$ pro stanovení parazitní (anomální) tepelné radiace pro obvyklé problémy, vypočítané v úvodu článku, je již zcela vyhovující.
- c) zóna ustálených teplot některými autory dělená na zónu skoro ustálených a ustálených teplot je zónou, kde je vliv letní a zimní periody již skoro nepatrný. Je to zóna, v níž již nepůsobí charakter povrchových vrstev první a druhé zóny. Samozřejmě jsou-li vrstvy ve všech zónách homogenní a bez vodní migrace. Kolísání teploty solárním vlivem činí již jen $\pm 0,01$ a méně. Zóna ustálených teplot je zónou, ve které se již neprojevuje vliv povrchových činitelů. Je to nejvhodnější prostor pro přesná geotermická měření. Od hranic této zóny se měří přesně zemský tepelný gradient.

Hranicí zóny ustálených teplot nazýváme někdy také neutrální zónou. Je to definované místo pod povrchem Země, kde je vliv solární radiace roven nule. Od neutrální zóny níže je teplota po celý rok stejná a tato teplota odpovídá tzv. střední roční teplotě daného místa. Je to vlastně hranice, odkud bychom volili korekce na tzv. stálou teplotu.

Tabulka rozdělení zón

č. 1

		hloubka
zóna povrchových teplot	{	kolísání teplot až 10°C cca 0,2-0,4 m
zóna proměnných teplot	{	kolísání teplot - $0,1^\circ \text{C}$ cca 1 - 2 m
zóna skoro ustálených teplot	{	kolísání teplot - $0,01^\circ \text{C}$ cca 18-20 m
zóna ustálených teplot	{	----- hranice neutr. zóny -----
	{	kolísání teplot méně než $0,001^\circ \text{C}$

Pozn.: rozpětí teplot : kolísání teploty solární radiací při roční periodě.

Zóna proměnných teplot

Protože se vlastně zabýváme převážně touto zónou, provedeme proto částečná teoretická zdůvodnění. Tato pak srovnáme s pokusy, které byly pro tento účel provedeny.

Zóna proměnných teplot sahá (podle tab. 1) poměrně nehluboko. Vlivy denních, měsíčních i ročních period a konečně i víceleté změny ovlivňují více méně teplotu popisované zóny a vytvářejí tím jisté periodické až kvasiperiodické cykly. Energetické změny pak vyvolávají tepelný tok, který se šíří zemí podle dosti složitých závislostí i v izotropickém nehomogenním prostředí - což by byl pro výpočty přijatelný model. (Ve skutečnosti je prostředí tepelně i hmotově nehomogenní a anizotropní).

Toto tepelné pole vyvolané vlivem slunečního záření a ochlazování tepelnými minimy je pro naše termometrická měření nežádoucí, protože přikrývá slabé indikace námi hledaných termických anomálií, jež jsou vyvolány např. zemním požárem, metamorfózou uhelné sloje apod. v hloubce, kterou máme určit. Pozn. : neuvažujeme zde vliv geotermického gradientu, ač jej pro korekci "a" nutno vypočítat.

Podle vypočtených korekcí dáváme tepelné indikátory do větší či menší (vyšší produktivita měření) hloubky.

Stručné teoretické předpoklady

Fyzikální jednotky užité

jedn.	název jednotky	cgs	MKS	SI
S	plocha	cm ²	m ²	m ²
x	daná hloubka	cm	m	m
s	čas	sec	hod	sec
T	teplota absolutní	°C /K/	°C /K/	deg K
t	teplota obyčejná	°C	°C	deg C
a	měrná teplotní vodivost	cm ² /sec	m ² /hod	m ² h ⁻¹
λ	koef. tepelné vodivosti	cal/cmsecst	kcal/mhodst	kcalh ⁻¹ m ⁻¹ deg ⁻¹
Q	množství tepla	cal	kcal	J=m ² kg s ⁻²
φ(q)	tepelný proud	cal/sec	kcal/hod	kcalh ⁻¹
φ(w)	hustota tepel. výkonu (spec. tepelný tok)	cal/sec cm ²	kcal/hod m ²	kcal m ² h ⁻¹
c	měrné teplo	cal/gst.	kcal/kg	kcalkg ⁻¹ deg ⁻¹
k	součinitel prostupu tepla	cal/sec cm ² st	kcal/hod m ² st	kcalh ⁻¹ m ⁻² deg ⁻¹

l	měrné skupenské teplo	cal/g	kcal/kg	kcal kg ⁻¹
P	hvězdný den /86 400/	sec	sec	s
ρ	měrná hmotnost	g/cm ³	kg/m ³	kg m ⁻³
ω	úhlová rychlost	1°/sec	1°/hod	1° s ⁻¹
P	perioda kmitání	sec	sec	s
T ₀	poč. amplitudy	°C	°C	deg C

Množství tepla procházející určitým průřezem závisí na teplotním spádu, velikosti průřezu, druhu a uspořádání hmoty a na velikosti časového okamžiku:

$$Q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{x} A t \quad \text{při} \quad \frac{dQ}{dx} = q$$

poměr $\frac{dT}{dx}$ nazýváme tepelným gradientem.

Tepelný proud je proměnný - vzniká tzv. tepelná vlna /s frekvencí denní a noční, měsíční atd. - viz popis zón/

Při obecném řešení vycházíme z okrajových podmínek Fourierových rovnic /lit. : Ingersoll, Klíma/

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a / \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T$$

hraniční podmínka I. : $T = T_0 \sin \omega t$ při $x = 0$

$$\text{rovnice kmitání je } \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = b^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

nahradíme-li veličiny $\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -b^2 T$ kde : $a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -b^2 T$

pak : $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{b^2}{a} T$ a řešení této rovnice je harmonická rovnice obyčejného

diferenciálního typu : $T = A e^{\frac{bx}{\sqrt{a}}} + C e^{\frac{-bx}{\sqrt{a}}}$

když při harmonickém pohybu $C e^{\frac{-bx}{\sqrt{a}}}$ položíme rovno 0 a řešíme exponent rovnice, dostaneme výsledný vztah : $T_k = 2T_0 e^{-x \sqrt{\frac{\omega^2}{2a}}}$ a při úpravě $\omega = \frac{2\pi}{P}$

$$\text{pak } T_k = 2T_0 e^{-x\sqrt{\frac{P}{\lambda a}}}$$

Tuto rovnici pak považujeme jako základní pro odvození pojmu tepelné vlny v homogenním prostředí.

Teplotní vodivost a

Kromě časové difference P, počátečních hodnot T_0 , x, potřebujeme znát teplotní vodivost hornin, tzv. měrnou teplotní vodivost. Tuto volíme pro prvotní informační měření z tabulek a nakonec při větším počtu měření jí stanovíme ze vzorce

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{P}{\lambda a}}$$

$$\text{tento vzorec zjednodušíme úpravou : } a = 0,0796 \frac{Px^2}{\Delta t^2}$$

Určit ,a' lze laboratorně i přímo v terénu. Ukážeme příklad terénního určení hodnoty a :

Vycházíme z možnosti změřeni stabilizování tepelné vlny v daném prostředí. (Pojem tepelné vlny bude vyložen dále - v stati o tepelné vlně.) Stabilizování je úměrné hloubce a času, který na známém pokusném místě měříme pronikání z nějakého tepelného zdroje až již umělého - např. důlní požár neb využitím extrémních podmínek normálního tepelného režimu - např. výskyt extrémních teplot nebo mrazů - ovšem krátkodobě. Poslední postup je při možnosti dlouhodobého měření pohodlnější. V terénu Modlany byl užitý druhý způsob, (jak v zimě tak i v létě) v terénu, kde nebyl výskyt žádného možného tepelného rušení. Zjištěné hodnoty, měřeno zkušební sondou /rtuťový teploměr/ v různých hloubkách, jsou dány v následující tabulce. V tabulce nejsou uvedeny korekce povrchových teplot, a to proto, že jednak rozdíl časový nebyl vzat přesně /měření nebylo konáno pravidelně/ a jednak aritmetickým průměrem změřených hodnot bylo měření přibližně vyrovnáno.

$$\text{při } a = \frac{Px^2}{4t^2} \quad \text{kde } k = P/4 = 687,8 \pm 6,88 \cdot 10^2$$

Ozn.	$k \cdot 10^2$	x	$t \cdot 10^3$	$x^2 \cdot 10^3$	$t^2 \cdot 10^7$	$x^2 / t^2 \cdot 10^{-6}$	$a \cdot 10^{-3}$
1	6,88	20	7,5	0,4	5,62	7,11	4,9
2	6,88	40	15,78	1,6	25,00	6,40	4,4
3	6,88	60	20,80	3,6	43,30	8,30	5,6

4	6,88	80	30,55	6,4	93,50	6,83	4,7
5	6,88	100	36,30	10,0	132,00	7,59	5,2
6	6,88	120	42,80	14,4	183,00	7,86	5,4
7	6,88	150	54,10	22,5	293,00	7,69	5,3
8	6,88	200	73,60	40,00	542,00	7,38	5,1
9	6,88	250	90,00	61,5	810,00	7,71	5,3
							$\bar{\sigma} = 5,1$

Průměrná hodnota a' zemin v Modlanské oblasti činí pro průměrnou hloubku 75 cm $a = 5,1 \cdot 10^{-3}$ /IS/. Tato hodnota byla pak vzata pro další výpočet. Ostatní způsoby určení a' nejsou uváděny. /Viz odkaz na přísl. literaturu/.

Jako příklad některých hodnot a pro různé horniny poskytuje následující tabulka :

hornina	$\cdot 10^{-3}$	$a \cdot 10^{-3}$	hornina	$\cdot 10^{-3}$	$a \cdot 10^{-3}$
žula	6,5	12,7	vápnitý jíl	1,7	1,9
pískovec	6,2	11,3	vápenec	4,8	8,1
křemitý písek suchý	0,6	02,0	měď	808,0	1 032,0
křemitý písek vlhký	1,4	3,3	voda	1,32	1,31
křemitý písek s jílem	2,2	3,7	voda	1,64	1,69
suchá půda	0,4	2,3	vzduch	0,055	178,0
vlhká půda	3,0	4,0	led	5,3	11,8
vlhká půda	8,0	10,0	led	6,2	12,5

Pozn. : hloubka uložení snímače x v cm. Vlhká půda - není udáno % nasycení vodou.

Tepelná vlna

Teplo přechází z prostředí o vyšší tepelné kapacitě k hodnotě menší neb jinak : z vyššího potenciálu do nižšího /tzv. tepelný potenciál/. Podle již uvedené rovnice

$$Q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{x} A t$$

však ještě vyplývá vliv (vedle již di-

skutovaného charakteru horniny - viz určení - a) také závislost časová. Je jasné,

že i zdroj o vyšší tepelné kapacitě nedosáhne takové hloubky proniku jako zdroj o nižší tepelné kapacitě, ale působící delší dobu. Při tepelných zónách již byla zmínka o denních, vícedenních, ročních /zimních a letních/ a jiných dlouhodobých změnách při pronikání tepelných kvant pod povrch země. Proto jsou nutné korekce na tepelné vlivy, i když počátek byl vyvolán třeba i před několika měsíci. V praxi uvažujeme korekce celoročního průběhu teploty měřeného území, vliv okamžité - denní teploty minulého dne a korekci na teplotu vzduchu paralelně s jednotlivým měřením. Všechny tyto korekce odečítáme od opravené naměřené hodnoty a to v součtovém tvaru $Q_v = Q_p - Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots$. Všechny zmíněné vlivy vyvolávají setrvačností vliv, jež graficky znázorněn v souřadnicích T/t (teplota/čas), vytváří křivku, jež má zhruba sinusový průběh. Proto lze tyto křivky řešit Fourierovou analýzou. Popis tohoto způsobu interpretace, jež byl též pokusně použit na terénu Modlany by však přesáhl rámec tohoto článku /viz literaturu č. 2/.

Výsledný vzorec $T_R = T_0 e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{aP}}} \sin \left(\omega t - x \sqrt{\frac{\pi}{aP}} + \varphi + \tau \right) \dots$ lze redukovat na tvar $T_R = 2 T_0 e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{aP}}}$, který zcela postačí na výpočet vlivu hloubky, a také zdánlivé rychlosti pronikání tepelné vlny. Počítáme ovšem pro každý tepelný extrém, který jsme před měřením a při měření v dané oblasti zachytili. Podotýkáme, že v měřené oblasti je nutné jednak nejméně půl roku předem měřit průběžně teplotu s časovým intervalem hustším tím více, čím více se blíží plánovaný termín měření /bližší v popisu metodiky vlastního měření/.

Řešíme shora uvedenou rovnici : rozložíme exponent pro jednotkové půlvlny sinusové křivky, kde :

lichá n je minimum

sudá n je maximum

kdy průběh křivky má více jak 2 půlperiody.

$$\omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2a}} = /2n + 1/ \cdot \frac{\pi}{2}$$

$$t = 3/2 \pi$$

$$\text{pak } t = \frac{x \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + /2n + 1/ \cdot \frac{\pi}{2}}{\omega}$$

$$\omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2a}} = 3 \pi/2$$

$$\text{a zdánlivá rychlost vlny : } v = x/t_1 = 2 \sqrt{\frac{\pi a}{P}} ; t_1 = x \sqrt{\frac{1}{2a\omega}} = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{P}{\pi a}}$$

$$\lambda_0 = VP = 2\sqrt{\pi aP}$$

Pozn. : λ_0 = vlnová délka

$$\text{Periodický tepelný tok povrchem je } Q/A = \lambda T_0 \sqrt{\frac{2P}{\pi a}}$$

Uvedeme jednoduchý příklad na denní tepelný časový chod

$a = 0,0049$ /viz tabulku určení a /

$$T_{\max} = 16,1^\circ\text{C}, T_{\min} = -3,95^\circ\text{C}, T = 20^\circ\text{C} \quad T_z/2 = -6^\circ\text{C}$$

$$T_0 = T_{\max} - T_z/2 = 16 - /+6/ = 10^\circ\text{C} \quad \text{při } x = 30 \text{ cm a } T_0 = 10^\circ\text{C}$$

$$\text{pak : } T_R = 2 T_0 e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{aP}}} = \frac{2 \cdot 10}{1} e^{-30\sqrt{\frac{\pi}{0,0049 \cdot 86400}}} = 1,5^\circ\text{C}$$

$$t_1 = 30/2\sqrt{\frac{86400}{\pi \cdot 0,0049}} = 34860 \text{ sec} = 9 \text{ hod } 45 \text{ min}$$

a rychlost $V = x/t_1 = 0,30/34860 = 0,082 \text{ m/den}$ neb přibližně též

$$a \cdot \lambda_0 = 2\sqrt{\pi aP} = 2\sqrt{\pi \cdot 0,0049 \cdot 86400 \cdot 86400} = 73,8 \cdot 1000 \pm 0,074 \text{ m/den}$$

Pro výpočet vlivu tepelné vlny zvolíme a z tabulek neb vypočteme ze závislostí již uvedených. Protože je nutné několikanásobné počítání při určování hodnoty a , nejsou zpravidla výsledky obou postupů shodné.

Časový chod

Vliv tepelné vlny pro vlastní interpretaci měření uvažujeme jako časový chod. Je to proto, že korekce na tepelnou vlnu se provádí při běžném měření, které nelze provést zejména v rozlehlejších terénu za jeden den a trvá mnohdy i několik desítek dnů.

Protože měření z jednoho dne musí být navázáno na druhý den a protože v užití geofyzice pro tento postup se užívá termín navázání chodu, byl tento termín zaveden i v termometrii. Časový chod, tzv. tepelné vlny dne je uvažován pro jednodenní cyklus měření.

Jako příklad pro určení časového chodu slouží následující tabulka. Měříme na bázi /tj. v bodu, kterým navazujeme jednotlivá jednodenní měření/.

Datum	č. bodu	čas	teplota v $h = 1,5 \text{ m}$	teplota na povrchu

15.III.	báze	9,50	1,50	4,2
		12,40	1,8	6,9
10.IV.	"	9,30	1,0	9,9
		13,25	1,2	14,3
		16,07	1,4	14,7

13. IV.	báze	9,27	0,0	12,2
		13,21	0,4	16,2
		14,32	0,2	20,0
17. IV.	"	8,40	1,8	8,6
		13,28	1,6	13,5
21. IV.	"	11,02	0,0	-
		12,05	0,1	-
10. V.	"	11,40	0,0	-
		13,40	0,15	-

Pozn. : Měřeno v hloubce 1,5 m. Tepelný gradient není uvažován.

Báze měření je mimo tepelně exponované území. Naměřené tepelné ohnisko je vzdáleno cca 60 m v horizontálním směru. Teplota vzduchu při určování časového chodu je uvažována. Pro stanovení tepelného gradientu k bezprostřednímu povrchu je použit poslední sloupec předchozí tabulky. Z tabulky určíme jednoduchým postupem závislost teploty na čase. Viz příloha : určování časového chodu měření Modlany. Docílíme-li, že jsou jednotlivá měření v quasiparalelní závislosti i pro různá tepelně odlišná období, lze je vyrovnat podle váhy a tento graf je pak nositelem vyrovnání celého měření. Přesnost určení chodu je sice nižší, ale pro stanovení vlivu tepelné vlny je tento způsob nejjednodušší.

Datum	časový tepl. gradient	časový rozdíl	teplotní rozdíl	čas. chod
17. III.	0,34	2 hod	6,8 10,9	0,17/hod
13. IV.	0,31	2 hod	12,2 15,8	0,15/hod
15. IV.	0,28	2 hod	2,7 5,1	0,14/hod
21. IV.	0,10	50 min	-	0,12/hod
10. V.	0,08	45 min	-	0,10/hod
12. V.	0,15	1 hod	8,9 13,1	0,15/hod

$$\bar{\theta} = 0,14/\text{hod}$$

Výšková korekce /nerovnost povrchu/

Zkušenost ukazuje, že se máme vyvarovat měření v terénu, kde se vyskytují náhlé výškové změny.

Především určíme stupeň přesnosti snímání tepelného pole, jež závisí na hledané anomálii, její velikosti a hloubky a druh uložení. Dále je rozhodující časová náročnost měření. Dle toho volíme teploměrné čidlo. Např. terén Modlany byl měřen přesnými rtuťovými i odporovým elektrickým teploměrem. Je zřejmé, že se osvědčí teploměr s malou časovou konstantou tepelného vyrovnání. (Pro přesná měření trvá vyrovnání déle.)

geotermický stupeň :
$$g_{st} = \frac{H - h_o}{t_p - t_o}$$
 kde : H hloubka pozorované teploty
h_o hloubka s konst. teplotou
t_p tepl. hornin v hloubce H
t_o stř. roční tepl. vzduchu

gradient : $\epsilon_{\text{grad}} = \frac{t_p - t_o}{H - h_o}$

$$a = t - \frac{2}{1gh} gh$$

Dále v určeném terénu nalezneme místo, jež není rušené hledanou anomálií a v němž je homogenní hornina. Toto místo zvolíme jako srovnávací bázi. Na tomto místě měříme v různých hloubkách a pokud možno nejčastěji. Nejlépe se osvědčuje stálý registrační termometr třeba i o menší přesnosti. Vždy však provádíme měření na začátku, v polovině a na konci měření. Kromě tohoto bodu (má ležet ve stínu, abychom mohli měřit teplotu vzduchu v blízkosti otvoru vrtu, ve kterém provádíme kontrolní měření) lze určit i několik dalších opěrných vrtů. Hloubka má činit cca 3 m. Po nalezení optimální hloubky měření (viz graf - nomogram vztahu h - hloubky) vytyčíme čtvercovou neb profilovou síť, jejíž hustotu stanovíme podle velikosti předpokládané anomálie. Např. terén Modlany : hloubka sond 0,75 m hustota sítě 5 m. Sondy buď vrtáme neb vyrážíme. Po vyražení ucpeme vrt ucpávkou nejméně 3 - 5 cm dlouhou. Vrt časově stabilizujeme, aby se teplota vrtu porušená vrtáním vyrovnala. Asi po 1/4 hodiny (podle požadavku přesnosti měření) pokládáme měřicí čidlo. Nejlépe na stěnu vývrtu v předepsané výšce. Nikdy ne na dno (napadávká). Dbáme, abychom měli patřičný předstih při vyvrtávání či vyrážení otvorů.

Z měřicích zařízení by nejlépe vyhovoval termistorový termometr se stabilizací, uspořádaný do gradientového zapojení (dvě čidla nad sebou) tak, abychom beze ztráty času mohli také měřit přímo tepelný gradient.

Přesnost měření

Přesnost měření je stanovena z voleného termometrického tahu (profilu) provedeného metodou vícenásobného opakování.

$$\text{Stanovíme } \eta_1 = \frac{\sum (\varepsilon) + \sum (\varepsilon)}{n} \quad \text{a } \delta = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n-1}} \quad \text{čili}$$

střední chybu měření. Toto je obvyklý postup prováděný u geofyzikálních měření a není třeba jej popisovat.

Uvedeme jako příklad opět terén Modlany :

Č. měření	tepl.	částečný součet	ε	ε^2
1	9,80		-0,02	0,0004
2	9,70		+0,08	0,0064
3	9,90	$\sum_5 = 3,8$	-0,12	0,0144
4	9,60		+0,18	0,0324
5	9,80		-0,02	0,0004

6	9,80		-0,02	0,0004
7	9,70		+0,08	0,0064
8	9,80	$\sum_5 = 4,0$	-0,02	0,0004
9	9,90		-0,12	0,0144
10	9,80		-0,02	0,0004
$\frac{\sum}{n}$	9,78	$\sum \epsilon = 0,68$	$\sum (\epsilon)^2$	0,0828

$$\eta_1 = \frac{\sum (\epsilon) + \sum (\epsilon)}{10} = 0,68/10 = 0,068$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \epsilon^2}{n-1}} = \frac{0,083}{9,0} = 0,09^\circ\text{C}$$

Střední chyba měření činí 0,090. V kapitole o tepelné vlně uvádíme přesnost pro optimální měření 0,05 - 0,1°C. Odtud vyplývá požadavek přesnosti měření a tím i nepřímo uvažovaná hloubková zóna měření. Samotný elektrotermometr umožňuje měřit s přesností 0,05°C a více.

Jako ukázka přesnosti a výhodnosti termometrického měření je ukázán částečný výřez z terénu Modlany (viz mapu termoizohyps), kde byl určen úkol vytyčit směr a šíření tepelného zdroje (podzemní požár vzniklé uhlé sloje uložené 6 - 12 m pod povrchem částečně zastavěného terénu). Při měření bez korekcí byla anomálie vydělena jako elipsovité tvar místy deformované. Po opravě zmíněnými korekcemi se zřetelně vyjasnil obrys hořícího místa a tepelného kanálu, zřejmě pravoúhlý styk dvou chodeb, kterými se požár šířil. Určení hloubky podle teplotního gradientu v místě zašrafování bylo 9,5 10 a 10,5 m. Ve skutečnosti 11 m, podle vrtných výsledků.

Závěr

Článek nevyčerpává termometrickou tematiku. Tato je příliš rozsáhlá. Je zde jenom uveden postup výpočtu korekcí, jež umožňují měřit tepelnými čidly v menších hloubkách. Toto mnohdy značně urychlí orientaci v zmíněném terénu a je spolehlivou oporou pro následující detailní průzkum vedený náročnějšími prostředky. V novější době začínají pokusy s určováním termických anomálií infrafoto grafickým postupem. Podařilo se určit i mělce ponořené výchozy hnědouhelných slojí apod.

Tento způsob by byl daleko nejehospodárnější, ale pro detailní průzkum bychom opět museli zavádět korekční přepočty.

Článek nevyčerpává ani možnost zavedení korekcí z % vlhkosti hornin, přímého vlivu pokryvných hornin apod. Rovněž se článek nezabývá vyhodnocováním harmonickou analýzou a instrumentální technikou. K tomuto jako vodítko poslouží jmenovaná literatura.

Literatura

- | | | | |
|----------------------|---|--|------|
| 1. A. F. Čudovskij | : | Fizika teploobměna v počve | 1948 |
| 2. L. R. Ingersoll | : | Heat conduction with engineering geological | 1954 |
| 3. E. V. Kudrjacev | : | Nestacionarnyj teploobměn | 1961 |
| 4. S. S. Kutateladze | : | Osnovy teorii teploobměna | 1962 |
| 5. V. V. Rževskij | : | Osnovy fiziky gornych porod | 1964 |
| 6. T. C. Gurjev | : | Geotermický režim Sadonského ložiska. Časopis Geologie | 1965 |

S h r n u t í

Článek popisuje termometrickou metodu pro malé hloubky. Tato metoda vyžaduje zavedení pojmu tepelných zon a užití tepelných korekcí. Při specifikaci tepelných zon je užito teorie tepelné vlny a teplotní vodivosti hornin. Celý problém je proto zjednodušený a odvození k vlivu korekcí nečiní proto velké potíže. Článek uvádí metodiku měření, jež vyplývá z uvedených předpokladů zavedením tepelné vlny a teplotní vodivosti hornin v určité zvolené hloubkové zóně a to podle požadavků přesnosti měření. Na závěr článku je uveden příklad termometrického měření v prostoru vesnice Modlany - hledání starého důlního dolování, ve kterém vznikl požár.

Р е з ю м е

ТЕРМОМЕТРИЯ ДЛЯ МАЛЫХ ГЛУБИН

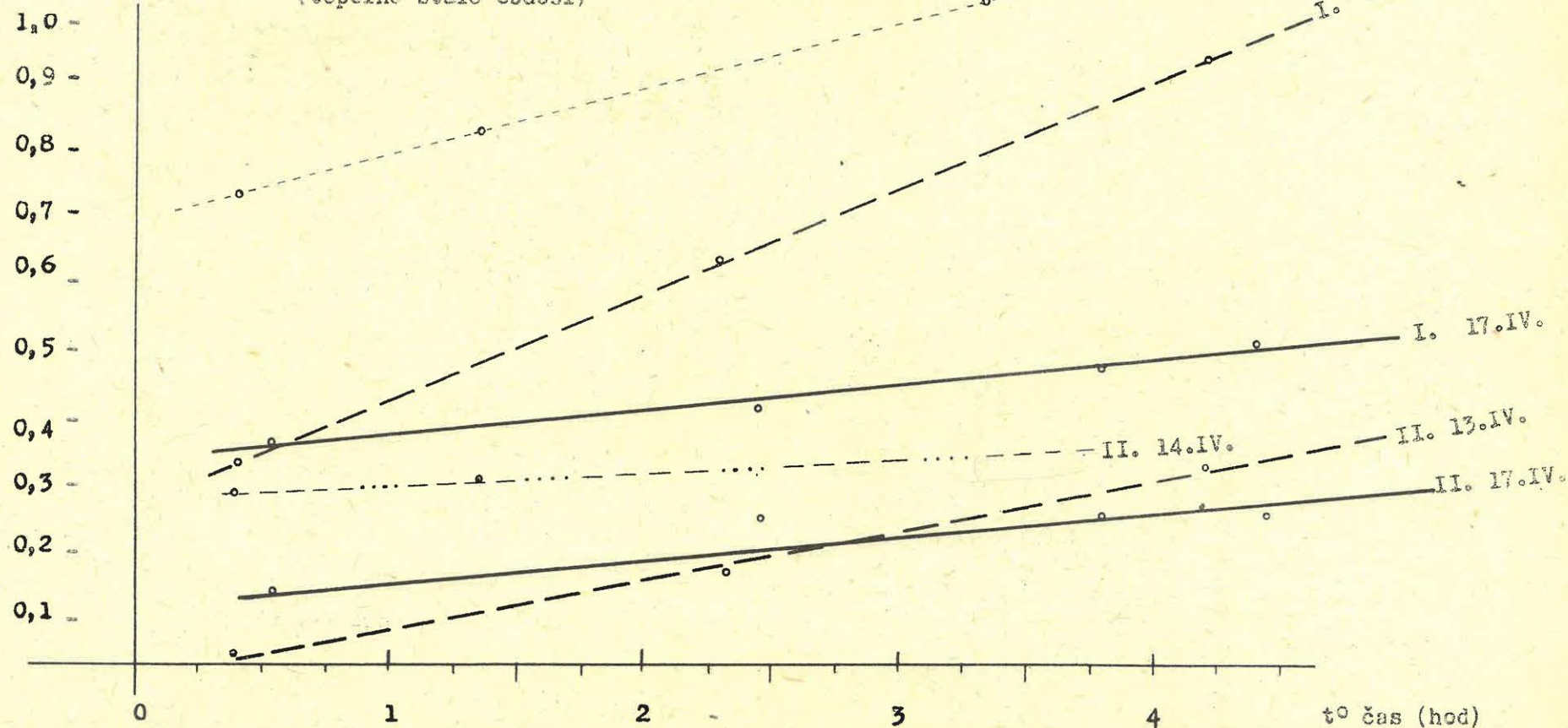
Статья описывает термометрический метод для малых глубин. Этот метод требует введения понятия термическая зона и применения термических коррекций. При спецификации термических зон применяется теория термической волны и температуропроводности горных пород. Вся

Příloha 1

$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$

T

Tepelný chod v relativním měřítku
(tepelně stálé období)



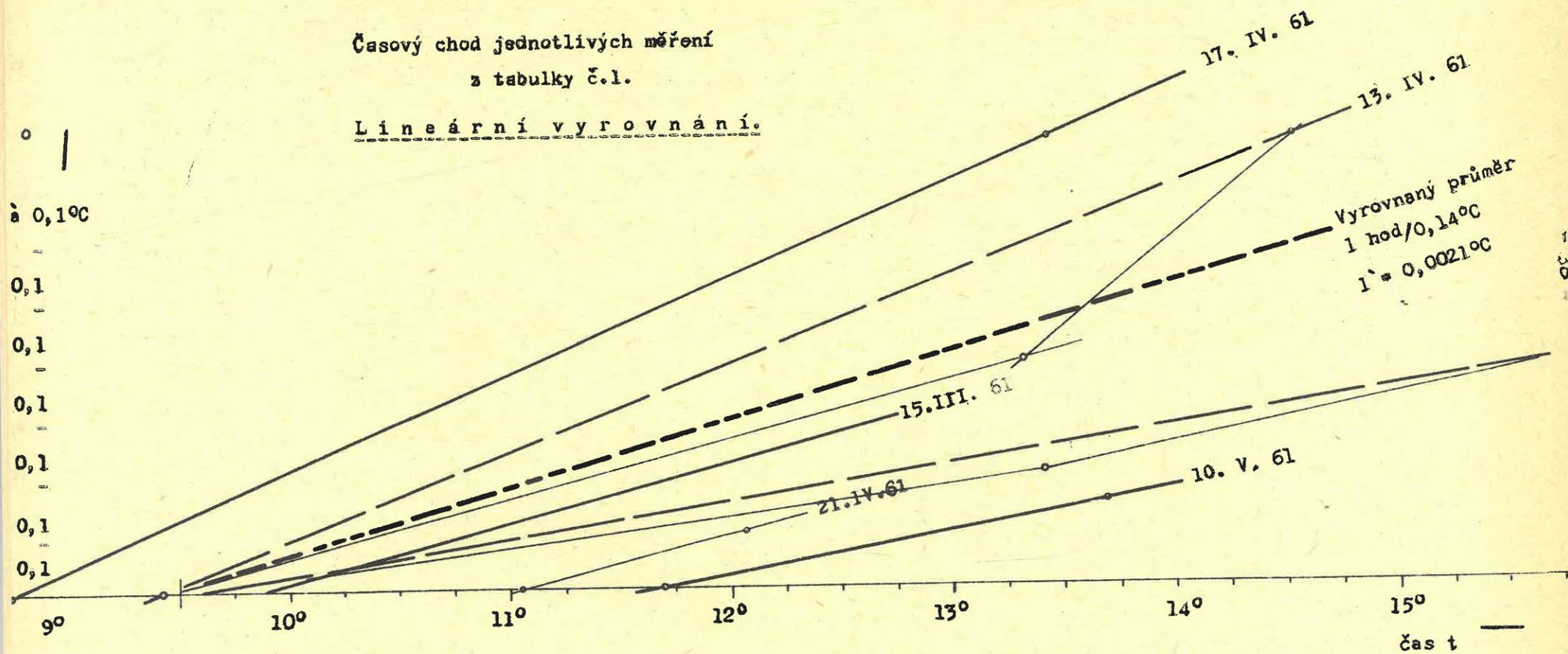
I. - měřeno 0,05m pod povrchem země
II. - měřeno 0,10m pod " " " "

rel. hodnoty

Příloha 2

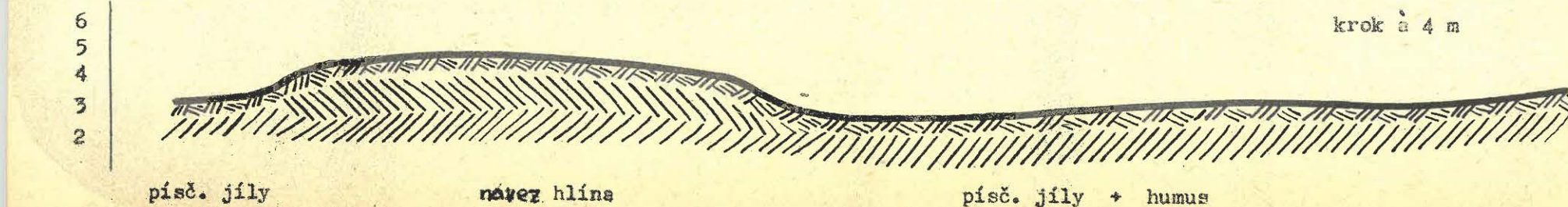
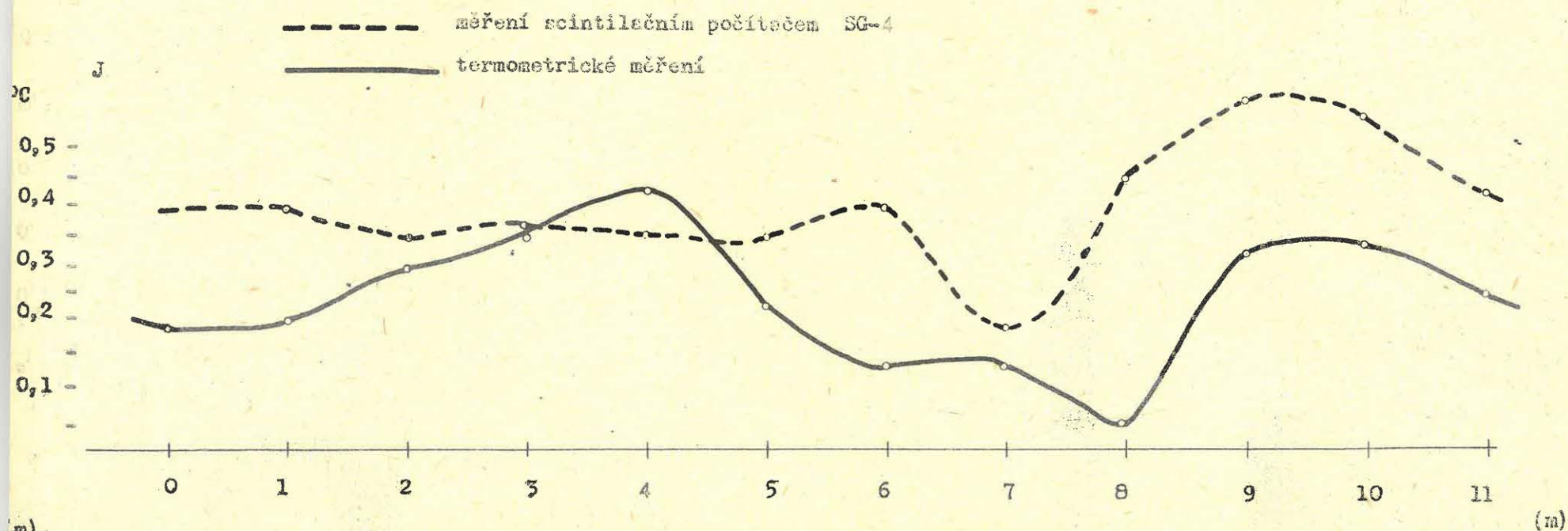
Časový chod jednotlivých měření
z tabulky č.1.

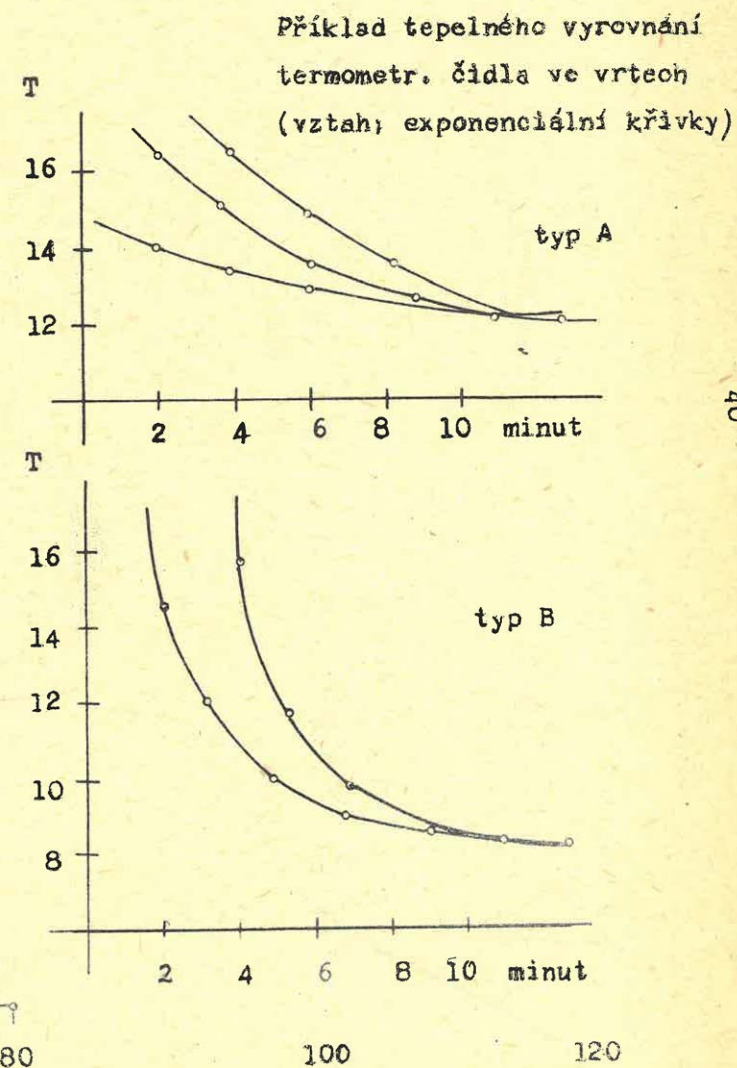
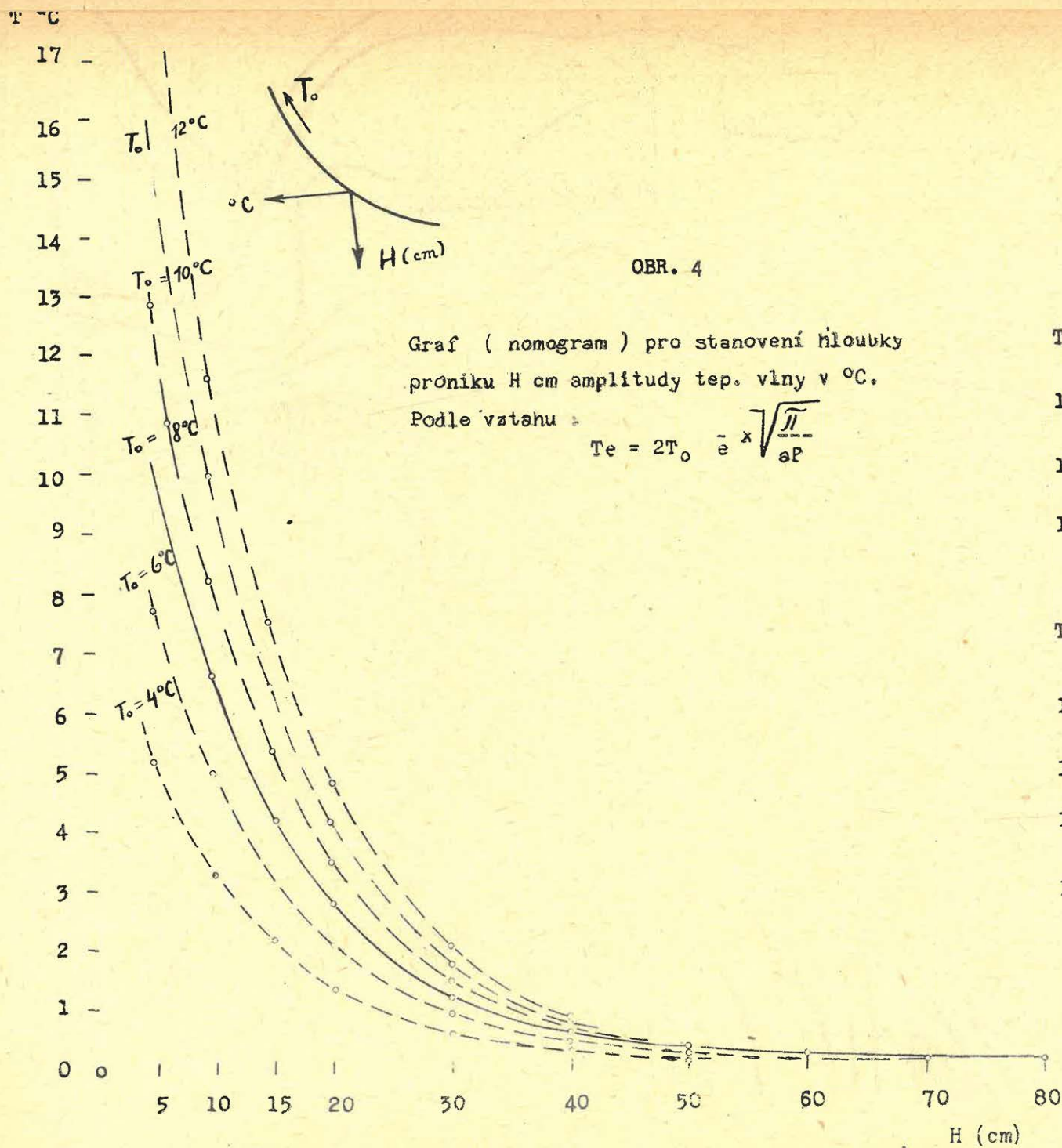
Lineární vyrovnání.



Příloha 3

Termometrický profil s výškovou výškou terénu
a inhomogenním povrchem měř. - 1 : 200





TERMOMETRICKÉ MĚŘENÍ V PROSTORU MODLANY
průběh geizoterm měř. 1 : 250

Příloha 5

