

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR
Forschungsbereich Geo- und Kosmoswissenschaften
ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIK DER ERDE

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde
Nr. 34

**Physikalische Eigenschaften
von Gesteinen und Mineralen
unter hohen Drücken und Temperaturen**

Vorträge, gehalten auf der Sitzung der Arbeitsgruppe 1.11 der KAPG
"Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen bei hohen
thermodynamischen Parametern" vom 25. 6. – 27. 6. 1973 in Jena

Herausgeber: Prof. Dr. habil. H. Stiller und Dr. H. Vollstädt

Als Manuskript gedruckt
Potsdam 1975

Wissenschaftliche Redaktion: Dipl.-Min. D. FREUND

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	4
LEBEDEV, T.S., BURTONYJ, P.A.; KORČIN, V.A.: Einige Fragen zum Verhalten des Porenraums und seine Beziehung zu der Geschwindigkeit elastischer Wellen in Gesteinen bei hohen Drücken	5
STILLER, H., VOLLSTÄDT, H., WÄSCH, R., KRAFT, A.: Licht- und röntgenoptische Untersuchungen von Mineralen unter hohem Druck unter Verwendung einer Diamantdoppelstempelapparatur	13
BAJUK, E.I., VOLAROVICĀ, M.P., EFIMOVA, G.A.: Die Geschwindigkeit elastischer Wellen in einigen gesteinsbildenden Mineralien bei Drücken bis 15 kbar	21
TOMSCHEY, O.: Vorläufiges über die Untersuchungen des Montmorillonits unter hohem Druck und Temperatur	31
LEBEDEV, T.S., SAVENKO, B.J., POSNANSKAJA, N.F., SHAPOVAL, V.I., KORČIN, V.A., LACHTANOV, V.T.: Neue Methodiken und Geräte zur Laboruntersuchung der magnetischen Eigenschaften von Gesteinen und Mineralien bei hohen Drücken und Temperaturen	35

Vom 15. - 27. Juni 1973 fand im Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR ein Symposium der KAPG-Arbeitsgruppe 1.11 statt.

Im vorliegenden Band sind wissenschaftliche Vorträge dieses Symposiums zusammengestellt. Die Beiträge vermitteln einen Eindruck der komplexen Methodik der geophysikalischen Festkörperuntersuchungen unter extremen Druck- und Temperaturbedingungen in den verschiedenen Laboratorien. Besonderes Augenmerk gilt dabei nach wie vor den Untersuchungen der Druckabhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit. Diese Untersuchungen werden im Rahmen der KAPG-Zusammenarbeit mehr und mehr ergänzt durch weitere physikalische Eigenschaften, wie z.B. elektrische und thermische Leitfähigkeit und magnetisches Verhalten. Für die Klärung der komplizierten Phasenverhältnisse werden optische und röntgenographische Untersuchungen unter hohem Druck durchgeführt.

Die KAPG-Arbeitsgruppe 1.11 hat es sich außerdem zur Aufgabe gemacht, die in den verschiedenen Laboratorien der beteiligten Länder durchgeführten Untersuchungen zu koordinieren. Im Vordergrund steht dabei die Standardisierung der Meßmethodik, die die Voraussetzung für eine sinnvolle geophysikalische Interpretation darstellt. Das entspricht auch der Zusammenarbeit mit der betreffenden RGW-Gruppe I-16.3, die für die Entwicklung einer spezifischen Hochdrucktechnologie verantwortlich ist.

Die nächsten Symposien werden besonders diesen Problemen der Unifizierung und Standardisierung der Meßmethodik gewidmet sein.

Prof. Dr. H. STILLER
Dr. H. VOLLSTÄDT

Einige Fragen zum Verhalten des Porenraums und seine Beziehung zu der
Geschwindigkeit elastischer Wellen in Gesteinen bei hohen Drücken

von

T.S. LEBEDEV, P.A. BURTYNJ, V.A. KORČIN ¹⁾

In der vorliegenden Arbeit der Abteilung für physikalische Eigenschaften der Erds-
substanz des Instituts für Geophysik der Akademie der Wissenschaften der USSR wurde
der Versuch unternommen, auf der Grundlage experimentell ermittelter Geschwindig-
keitswerte elastischer Longitudinalwellen [2, 3] und einer Analyse einiger anderer
physikalischer Eigenschaften und der Zusammensetzung von Granit das Verhalten des
Porenraumes bei Einwirken hydrostatischen Drucks bis 5 kbar zu charakterisieren [4].

Für die Untersuchungen wurde eine Sammlung von Graniten des Komplexes Kirovograd-
Žitomir verwendet, die im Bereich des Ukrainischen Schilids am weitesten verbreitet
sind.

Nach der Methodik von B.P. BELIKOV u.a. [1] wurden auf der Grundlage der Mineral-
zusammensetzung rechnerisch Geschwindigkeiten ermittelt. Für weitere Untersuchungen
wurden Proben zusammengestellt, deren errechnete v_p -Werte einem mittleren Wert
 $v_{p_m} = 6,05$ (6,0 - 6,1) km/s am nächsten lagen. Die untersuchten Granite wurden nach
Korngrößen der gesteinsbildenden Minerale in drei Gruppen unterteilt: erste Gruppe -
feinkörnig, zweite Gruppe - mittelkörnig, dritte Gruppe - grobkörnig. In jeder ein-
zelnen Gruppe hatten die Proben gleiche Elastizitätskennziffern und stimmten in eini-
gen anderen physikalischen Parametern überein. Außerdem hatten sie ähnliche Besonder-
heiten in Gefüge und Textur (s. Tafel). Dadurch konnte die Veränderung der Ausbrei-
tungsgeschwindigkeit elastischer Longitudinalwellen in diesen Gesteinen in Zusammen-
hang mit der Veränderung ihrer Porosität untersucht werden. Die Mittelwertskurven
(Abb. 1) weisen auf eine nichtlineare Veränderung der Geschwindigkeit in Abhängig-
keit von der Porosität (Φ) bei atmosphärischem Druck hin. Bei allen drei Granitgrup-
pen ist die größte Veränderung von v_p bei Erhöhung der Porosität von 0 auf 1,5 % zu
beobachten, wobei der Gradient der Veränderung von v_p in diesem Intervall mit größe-
rer Körnung der Gesteine zunimmt. Die Geschwindigkeitswerte, die ein Gestein mit
einer Porosität von nahezu Null kennzeichnen können, betragen für fein-, mittel- und
grobkörnige Gesteinsarten 6,09, 6,15 bzw. 6,28 km/s.

Wie aus Abb. 1 ersichtlich ist, zeichnen sich grobkörnige Gesteine durch einen
höheren Wert von v_p bei geringster Porosität aus, was sich durch die Verkleinerung
der wirksamen Kontaktfläche zwischen den Mineralkörnern nach dem quadratischen Gesetz

¹⁾ Geophysikalisches Institut der Ukrainischen Akademie der Wissenschaften, Kiev 68,
Ul. Novo Beličanskaya

Tab. 1 Physikalische Parameter und die mineralische Zusammensetzung der Granite des Kirowograd-Zitomirsker Komplexes (Ukrainischer Schild)

Name der Bohrung, Probennummer	Anzahl der Proben	Gesamt- dichte g/cm ³	Korn- dichte g/cm ³	Poro- sität %	v _p (km/s) bei P(kbar)			v _p extra- poliert km/s	akust. Wider- stand v _p	Mineralzusammensetzung (in Gewichtsprozenten)						Ges.Poro- sität errechnet g/cm ³	v _p errech- net km/s	
					0,001	1	5			Plagio- klas	Kalifeld- spat	Quarz	Biotit	Horn- blende	Pyro- xene			Akzesso- rien
feinkörnige																		
Ternivka, 33/111	3	2,710	2,710	≈ 0	6,09	6,21	6,33	6,18	16,50	41,8	17,9	34,2	1,11	-	3,7	1,3	2,69	6,10
Gajvoron, 18/50	1	2,648	2,653	0,11	6,04	6,21	6,32	6,15	15,95	39,7	28,8	29,4	0,7	-	-	1,4	2,65	6,08
Ul'janovka, 10/28	3	2,627	2,644	0,61	5,75	6,00	6,19	5,98	15,11	34,2	18,9	37,5	9,4	-	-	-	2,62	6,02
Norinsk, 74/46	3	2,610	2,630	0,76	5,87	6,05	6,20	6,06	15,32	8,9	45,9	38,4	3,7	-	-	3,1	2,59	6,00
Kamennyj Brod, 82/57	3	2,640	2,668	1,05	5,74	6,03	6,19	6,03	15,15	40,3	25,4	27,6	6,7	-	-	-	2,61	6,05
Novo-Romanovka, 81/56	3	2,646	2,676	1,12	5,69	6,12	6,27	6,11	15,06	40,1	27,8	26,1	4,9	-	-	1,1	2,65	6,04
Gajvoron, 18/53	3	2,616	2,653	1,13	5,90	6,09	6,23	6,08	15,43	34,4	33,4	31,7	-	-	-	0,5	2,59	6,08
Selenaja Levada, 22/65	3	2,619	2,649	1,14	5,68	6,09	6,25	6,08	14,88	39,5	11,6	41,9	7,0	-	-	-	2,61	6,04
Radomyšl', 55/8	3	2,621	2,658	1,39	5,62	5,99	6,14	5,98	14,72	32,0	21,5	30,5	14,0	-	-	1,9	2,61	6,04
Iosipovka, 19/58	1	2,607	2,664	2,14	5,82	5,94	6,17	5,95	15,17	47,4	17,5	34,5	0,6	-	-	-	2,60	6,02
Ivankov, 87/96	3	2,654	2,731	2,52	5,56	6,02	6,22	6,02	14,76	43,6	21,6	24,7	8,6	-	-	1,5	2,69	6,02
Mittel:		2,640	2,666	0,97	5,80	6,08	6,23	6,05	15,31	36,5	24,7	32,4	5,1	-	0,3	1,0	2,63	6,04
mittelkörnige																		
Pljakovka, 4/12	1	2,648	2,650	0,10	6,00	6,21	6,34	6,21	15,89	30,4	34,9	27,1	4,4	-	2,6	0,6	2,65	6,07
Konecpol', 23/66	3	2,617	2,619	0,10	6,14	6,28	6,39	6,28	16,07	35,4	39,0	24,9	-	-	-	0,7	2,61	6,07
Losovatoe, 32/115	3	2,747	2,760	0,36	5,87	6,25	6,40	6,21	16,09	27,3	15,3	40,4	7,3	-	-	4,0	2,75	5,99
Bechi, 70/38	3	2,667	2,677	0,38	5,98	6,26	6,40	6,24	15,95	29,2	21,7	34,8	8,9	-	-	5,6	2,74	6,05
Losovatoe, 32/114	3	2,739	2,750	0,71	5,61	6,22	6,40	6,20	15,37	45,6	26,7	18,0	7,0	-	-	2,7	2,75	6,00
Uman', 20/60	1	2,650	2,671	0,78	5,69	6,20	6,36	6,21	15,08	37,2	29,1	25,9	6,1	-	-	1,7	2,65	6,08
Belaja Cerkov, 35/1	3	2,639	2,665	1,00	5,63	6,05	6,21	6,06	14,51	30,6	23,1	31,7	11,9	-	-	2,5	2,67	6,00
Smolka, 80/55	3	2,630	2,660	1,13	5,45	6,07	6,24	6,08	14,33	33,2	25,8	37,8	4,2	-	-	-	2,63	6,07
Jagnjatin, 112/75	3	2,673	2,710	1,48	5,44	6,00	6,25	6,00	14,54	22,0	31,5	31,6	14,0	-	-	0,9	2,64	5,99
Polonnoe, 90/87	3	2,684	2,729	1,65	5,48	6,15	6,32	6,14	14,70	49,6	12,5	28,1	9,8	-	-	-	2,60	6,08
Bechi, 69/37	3	2,590	2,640	1,89	5,50	5,94	6,14	5,96	14,25	33,9	21,7	44,0	-	-	-	0,4	2,59	6,07
Guljanka, 78/51	3	2,607	2,672	2,43	5,42	5,91	6,12	5,93	14,13	42,8	33,5	19,3	4,4	-	-	-	2,63	6,10
Mittel:		2,657	2,683	0,97	5,68	6,13	6,30	6,13	15,09	34,8	26,3	30,6	6,5	-	0,2	1,6	2,66	6,05

		grobkörnige																
Ternovoe, 31/102	2	2,620	2,630	0,38	5,70	6,14	6,38	6,19	14,93	32,8	23,2	41,5	0,4	-	-	2,1	2,66	6,02
Boguslav, 45/212	1	2,626	2,637	0,42	5,52	6,12	6,28	6,14	14,50	36,2	20,2	32,7	8,9	-	-	2,0	2,68	6,02
Batutino, 7/21	2	2,593	2,611	0,58	5,62	6,44	6,64	6,49	14,57	48,3	25,6	24,0	2,1	-	-	-	2,60	6,08
Kirovograd, 28/77	3	2,643	2,660	0,61	5,43	6,37	6,58	6,38	14,35	32,7	28,3	35,2	3,8	-	-	-	2,65	6,08
Kirovograd, 28/79	3	2,672	2,690	0,73	5,29	6,07	6,23	6,09	14,13	32,4	27,8	30,2	8,1	-	-	1,5	2,67	6,00
K-Ševčenkovski, 46/213	3	2,680	2,701	0,74	5,53	6,42	6,57	6,44	14,82	23,5	54,8	16,3	2,4	-	2,0	1,0	2,64	6,05
Boguslav, 45/211	3	2,646	2,667	0,85	5,24	6,24	6,42	6,25	13,87	35,4	20,7	32,3	9,6	-	-	2,0	2,67	6,01
Chochitva, 44/210	3	2,612	2,635	0,87	5,48	6,15	6,32	6,16	14,31	18,3	38,8	37,9	3,5	-	-	1,5	2,64	6,00
Kirovograd, 28/80	2	2,600	2,630	1,33	5,21	6,51	6,70	6,56	13,55	16,3	52,1	21,2	3,4	-	-	7,0	2,68	6,03
Ternovoe, 31/101	3	2,620	2,660	1,50	5,09	6,18	6,46	6,23	13,33	34,0	36,1	26,5	0,9	-	-	2,5	2,66	6,09
Mittel:		2,631	2,652	0,80	5,41	6,26	6,46	6,29	14,23	31,0	32,7	29,8	4,3	-	0,2	2,0	2,66	6,04
		grobkörnige Rapakiwi-Granite(Korostenski-j-Komplex)																
Iskrennoe, 5/15	2	2,664	2,668	0,10	6,28	6,44	6,57	6,45	16,73	15,0	48,9	32,8	2,1	0,8	-	0,4	2,63	6,08
Penizeviči, 51/1	3	2,644	2,658	0,53	5,77	6,41	6,54	6,39	15,26	7,7	66,9	16,6	0,9	2,8	2,6	2,5	2,65	6,08
K-Ševčenkovski, 1/1	3	2,651	2,686	1,36	5,29	6,41	6,61	6,42	14,02	11,3	65,0	18,2	1,6	2,5	-	1,4	2,67	6,06
Iskrennoe, 5/13	2	2,640	2,680	1,50	5,05	6,55	6,73	6,56	13,33	23,1	45,6	23,5	2,0	3,5	-	2,3	2,66	6,09

Anmerkung: Die Daten für die Rapakiwi-Granite wurden nur für das Diagramm $v_p = f(\phi)$ verwendet

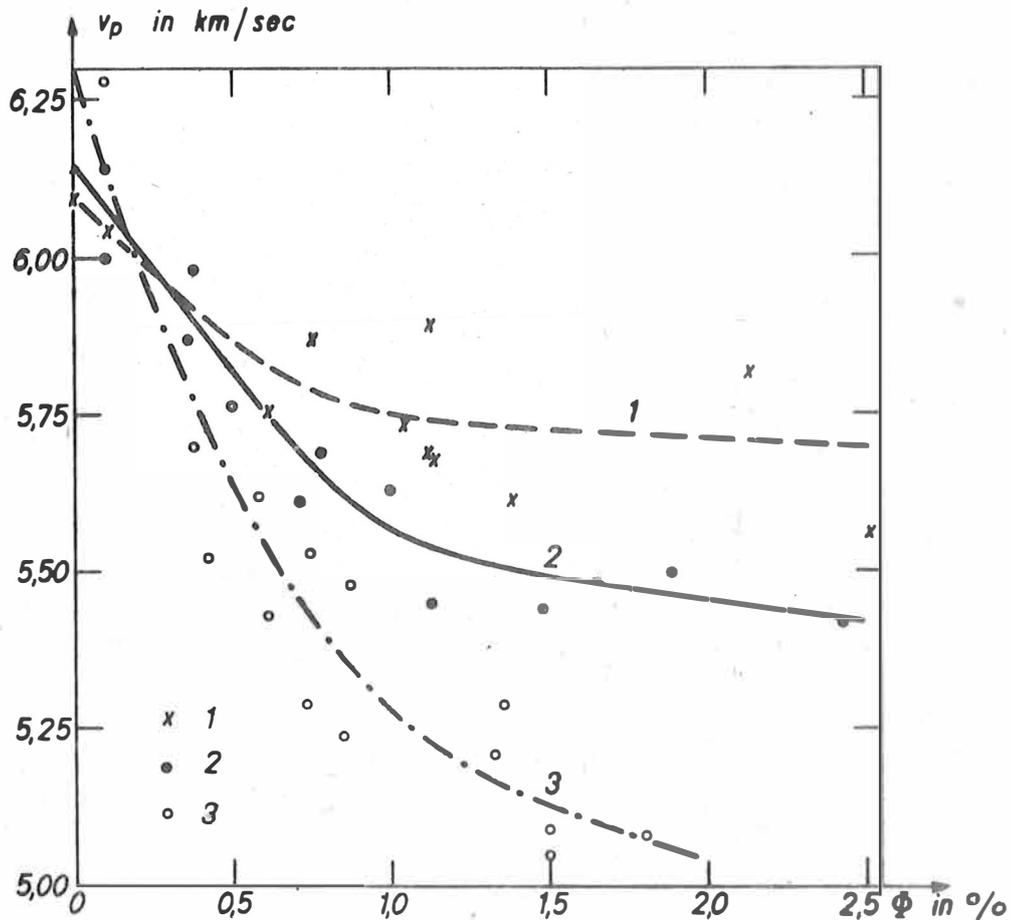


Abb. 1. Die Longitudinalwellengeschwindigkeit (v_p) in Abhängigkeit von der Porosität (Φ) für 1 = fein-, 2 = mittel-, 3 = grobkörnige Granite

bei zunehmender Korngröße erklären läßt. Dies zeugt davon, daß grobkörnige Gesteine in diesem Fall einem ideal elastischen Medium am ähnlichsten sind.

Untersuchen wir ein typisches Kurvenbild der Veränderung von $v_p = f(P)$ (Abb. 2): Die Kurve $v_p = f(P)$ kann in zwei Abschnitte, in einen linearen und einen gekrümmten, unterteilt werden. Die lineare Abhängigkeit unterstreicht die elastische Verformung des Gesteins nach dem HOOKE'schen Gesetz. Nach Extrapolation des linearen Kurvenabschnitts bis zum Schnittpunkt mit der Druckachse im Nullpunkt erhalten wir die Gerade AB, die die Veränderung der Geschwindigkeit in dem genannten Gestein in Verbindung mit der Veränderung der elastischen Eigenschaften seiner Mineralkomponenten kennzeichnet, und der Schnittpunkt legt den Wert v_p fest, der das Gestein mit geschlossener aktiver Porosität und konkreten Besonderheiten im Gefüge und in der Textur kennzeichnet. Der gekrümmte Kurvenabschnitt ist somit vor allem auf die Veränderung der Geschwindigkeit der Longitudinalwellen durch Verschluß des Porenraumes in dem realen Gestein und durch die elastische Verformung seiner Mineralkomponenten zurückzuführen, was z.B. zu einer Veränderung der Geschwindigkeit um den Wert ΔV im Punkt K führt. Die Übergangsstelle des gekrümmten Kurvenabschnitts in den linearen Abschnitt (Punkt K) gibt den Wert des Druckes an, bei dem die Porosität keinen Einfluß mehr auf die Geschwindigkeit der elastischen Wellen hat. Nachdem grafisch aus

der Kurve $v_p = f(P)$ die Werte ΔV eliminiert wurden, die den Veränderungen von v_p in Verbindung mit der elastischen Verformung der Minerale in Punkten mit unterschiedlichem Druck entsprechen, erhalten wir die Kurve NM, die die Veränderung der Geschwindigkeit allein auf Grund der Porosität zum Ausdruck bringt.

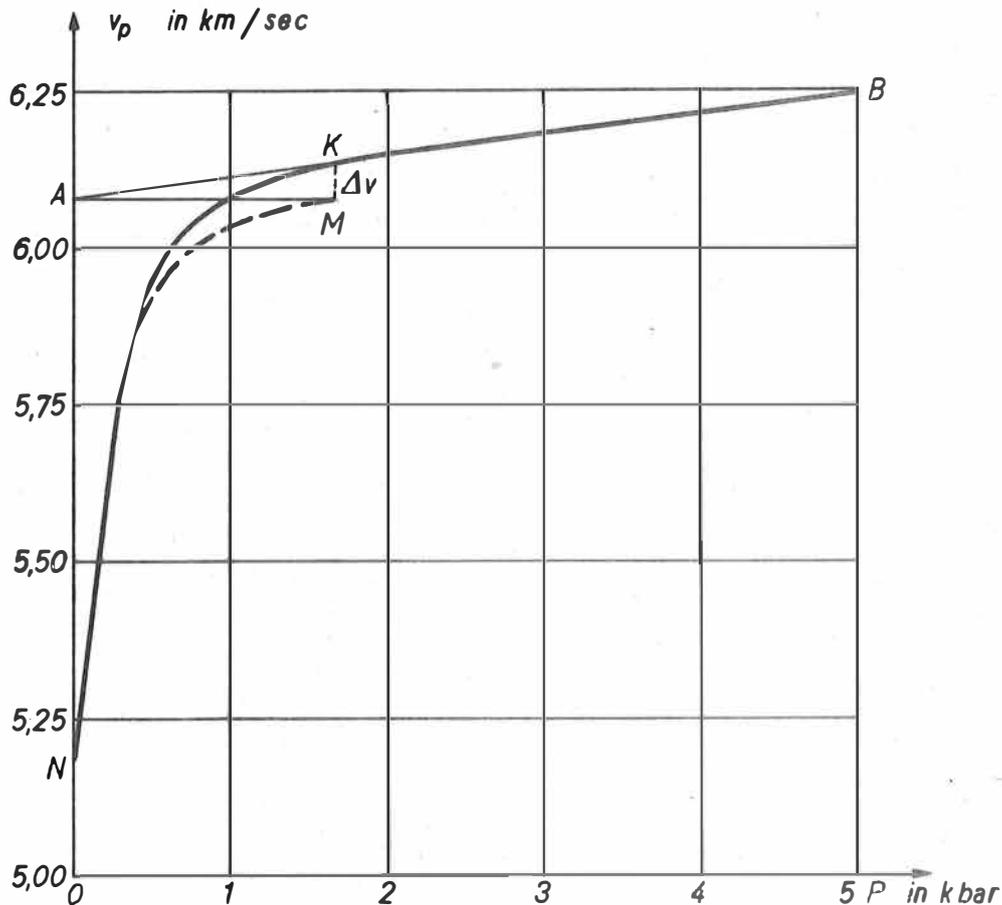


Abb. 2. Typisches Kurvenbild $v_p = f(P)$

Die in Abb. 3 gezeigten Kurven wurden auf der Grundlage gemittelter Werte der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen für alle drei Granitgruppen bei Druckerhöhung auf 5 kbar dargestellt (Kurven 1, 2 und 3). Die Geschwindigkeit steigt bei allen drei Gruppen steil an, wenn der Druck auf 2 kbar erhöht wird, jedoch sind die Gradienten der Veränderung von $v_p = f(P)$ unterschiedlich und wachsen mit zunehmender Größe der Mineralkomponenten des Gesteins. Die Werte v_p , die Gesteinen mit geschlossener aktiver Porosität entsprechen, werden durch die Werte 6,05, 6,13 und 6,30 km/s für fein-, mittel- und grobkörnige Gesteinsarten ermittelt. Die Kurven 1', 2' und 3', die nach der bereits beschriebenen Methodik konstruiert wurden, kenn-

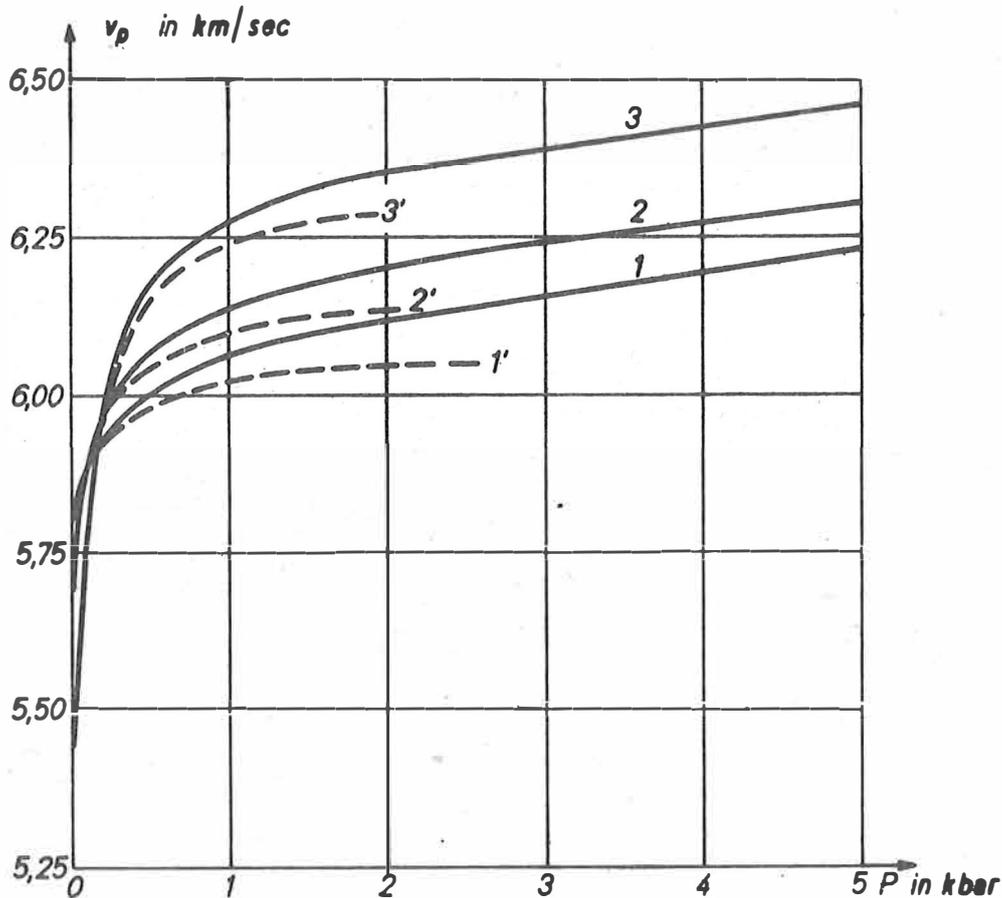


Abb. 3. Die Schallgeschwindigkeit (v_p) in Abhängigkeit vom Druck (P) für 1 = fein-, 2 = mittel-, 3 = grobkörnige Granite. Die gestrichelten Linien (1', 2', 3') geben den Verlauf $v_p = f(P)$ an, der nur auf das Verschließen des Porenraumes zurückzuführen ist

zeichnen die Veränderung der Geschwindigkeit der Longitudinalwellen in Verbindung mit dem Verschluß des Porenraumes für jede der drei Granitgruppen. Wir legen diese Annahme zugrunde, bestimmen nach den angegebenen Kurven die Werte v_p , die einem bestimmten Druck entsprechen, sowie nach den gemittelten Kurven der Veränderung $v_p = f(P)$ die Porositätswerte für diese Werte v_p und können so das Verhalten des Porenraumes bei Druckerhöhung verfolgen.

In Abb. 4 sind die verallgemeinerten Kurven der relativen Veränderung des Porenraumes der drei Granitgruppen bei Druckerhöhung gezeigt. Die Größe P , bei der die Porosität keinen Einfluß mehr auf die Veränderung von v_p ausübt, und die Form der Kurven, die den Verschluß des Porenraumes kennzeichnet, hängen vor allem von der Körnung des Gesteins ab.

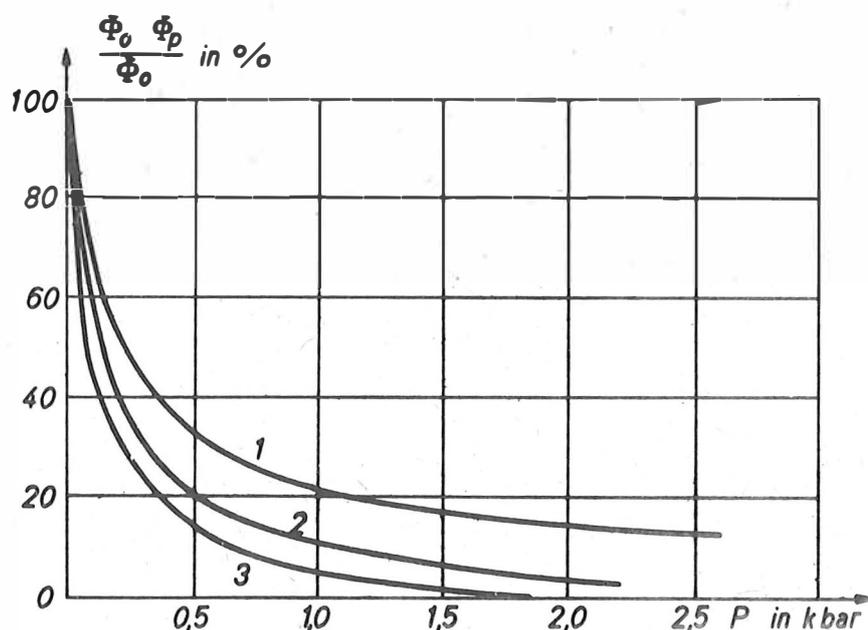


Abb. 4. Das Verhalten der Porosität bei Druckeinwirkung für 1 = fein-, 2 = mittel-, 3 = grobkörnige Granite

Somit bestätigen die Ergebnisse unserer Untersuchungen, daß die Porosität und die Besonderheiten von Graniten im Gefüge und in der Textur die wichtigsten Faktoren sind, die die Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen bei 4 - 4,5 kbar Druck in Proben mit gleichem Mineralbestand beeinflussen. Der Verschluß des Porenraumes, der die Veränderung von v_p beeinflusst, erfolgt im wesentlichen bei etwa 2 - 3 kbar. Dabei ist der Wert dieses Drucks bei grobkörnigen Granitgesteinen am kleinsten, und der Grad der Veränderung der Porosität wächst mit zunehmender Mineralgröße.

Gegenwärtig werden bei den Gesteinen zwei Arten der Porosität unterschieden: die Volumenporosität und Spaltporosität. Eine intensive Geschwindigkeitserhöhung bei Druckerhöhung ist in erster Linie mit dem Verschluß der Spaltporen verbunden. Folglich kann angenommen werden, daß in grobkörnigen Gesteinsarten die Spaltporosität vorherrscht, während in feinkörnigen Gesteinsarten die Volumenporosität überwiegt. Außerdem kann gesagt werden, daß der Porositätscharakter durch die Größe der gesteinsbildenden Minerale bedingt ist.

Literatur

- [1] BELIKOV, B.P.;
ALEKSANDROV, K.S.;
RYŽOVA, T.V. Uprugie svojstva porodoobrazujuščich mineralov i
gornych porod.
Nauka, Moskva 1970
- [2] LEBEDEV, T.S. u.a. Eksperimentalnye dannye o nekotorych fizičeskich
svojstvach kristalličeskich porod centralnoj časti
Ukrainskovo Ščita.
Geofiz. Sb. Akad. Nauk ukr. SSR 34 (1970), S. 19-28
- [3] LEBEDEV, T.S. u.a. Uprugie svojstva gornych porod pri vysokich
davlenijach.
Naukova dumka, Kiev 1972
- [4] LEBEDEV, T.S.;
BURŤNYJ, P.A.;
KORČIN, V.A. Svjaž porovogo prostranstva so skorost'ju uprugich
voln v gornych porodach pri vysokich davlenijach.
Geofiz. Sb. Akad. Nauk ukr. SSR 54 (1973), S. 7-18

Licht- und röntgenoptische Untersuchungen von Mineralen unter hohem Druck
unter Verwendung einer Diamantdoppelstempelapparatur

von

H. STILLER, H. VOLLSTÄDT, R. WÄSCH, A. KRAFT ¹⁾

1. Vorbemerkungen

Für die Erforschung des physikalisch-chemischen Zustandes des Erdinnern ist es unerläßlich, möglichst viele Parameter zur Verfügung zu haben. Nur so ist eine sinnvolle Interpretation möglich, da ein derart komplexes Forschungsobjekt nur mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Meßdaten befriedigend untersucht werden kann. Neben Experimenten, die die Eigenschaften von Gesteinen klären, ist es zunächst notwendig, alle erfaßbaren physikalischen, chemischen und strukturellen Parameter der gesteinsbildenden Minerale zu untersuchen. Im vorliegenden Beitrag wird dazu die Leistungsfähigkeit einer Diamantdoppelstempelapparatur beschrieben, die zur Erfassung struktureller Daten und Phänomene eingesetzt wird. Es muß dabei jedoch gleich vorausgeschickt werden, daß hierbei keine Temperatur eingesetzt wurde, da sich Diamantstempelapparaturen dafür nur bedingt eignen. Eine Hochdruck-Hochtemperatur-Röntgenkammer befindet sich z.Z. im Konstruktionsstadium. Darüber wird zu gegebener Zeit berichtet werden.

2. Experimentelle Technik

Die Hochdruck-Röntgenuntersuchungen werden mit einer Diamantdoppelstempelapparatur durchgeführt. Das Konstruktionsprinzip dieser Kammer beruht auf einer von VAN VALKENBURG [1] erstmals beschriebenen Konzeption der Druckerzeugung: Der Druck wird mit Hilfe einer Spindel über eine Schraubenfeder und zwei Hebel erzeugt. Die Probe befindet sich zwischen zwei Diamantstempeln mit einer Druckfläche von $\sim 0,35$ mm Durchmesser, wobei die druckerzeugende Kraft durch die beiden Hebel auf den unteren - beweglichen - Stempel übertragen wird. Die Stempelfassungen sind so ausgelegt, daß für den Durchstrahl- und Rückstrahlbereich je ein 2θ von 25° zur Verfügung steht. Der Beugungsbereich ist durch die Art der Kammer und die Aufnahmetechnik begrenzt. Vorteilhaft dagegen ist die Möglichkeit der Eichung bis 100 kbar mit Hilfe eines Lichtmikroskops (Abb. 1).

¹⁾ Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR
15 Potsdam (DDR), Telegrafenberg

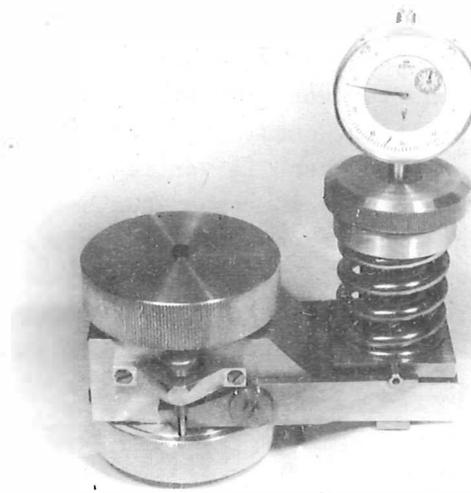
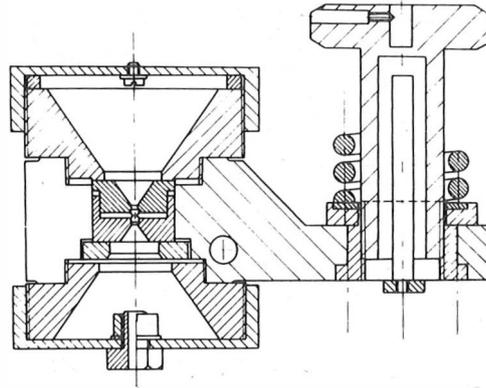


Abb. 1. Diamantdoppelstempelapparatur (Squeezer) für Durchstrahl- und Rückstrahlaufnahmen

2.1. Eichung

Die Druckeichung kann sowohl direkt als auch indirekt durchgeführt werden. Bei der direkten Eichung wird die Zustandsgleichung von NaCl ausgenutzt und aus der Änderung des Gitterparameters der Druck berechnet. So können wir einmal NaCl unter die Probe mischen (DECKER [3], [4]) und den Druck direkt bestimmen - was in vielen Fällen durch die geringe Probenmenge Schwierigkeiten mit sich bringt - oder die Meßuhr über mehrere NaCl-Aufnahmen eichen. Bei der indirekten Eichung werden Eichsubstanzen verwendet, deren druckbedingte Phasenübergänge direkt im Lichtmikroskop beobachtet werden können. Normaldruckphase und Hochdruckphase besitzen einen unterschiedlichen Brechungsindex, so daß sich der Grenzbereich zwischen beiden Phasen durch die Beckesche Linie markiert. Die neue Phase bildet sich zunächst im Zentrum der Druckfläche und weitet sich, dem Druckgradienten auf der Stempelfläche folgend, mit steigendem Druck über den gesamten Flächenbereich aus.

Als Eichsubstanzen werden vornehmlich Alkalihalogenide und einige andere Verbindungen (im wesentlichen Salze) wie z.B. KNO_3 , RbCl , CuJ , AgCl und AgJ verwendet. In den folgenden Abbildungen (Abb. 2 - 4) werden einige Phasenübergänge gezeigt.

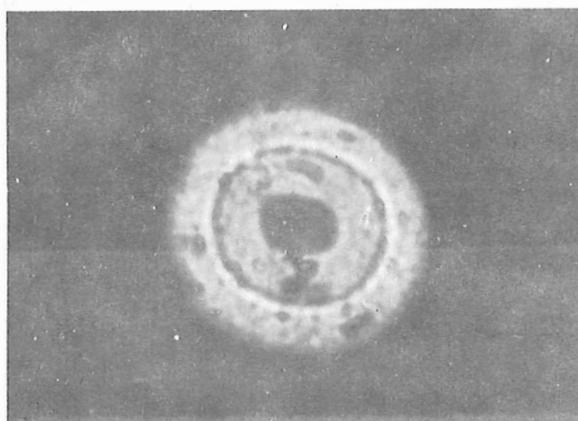


Abb. 2. CuJ-Phasenübergänge bei 4 kbar und 15 kbar
 4 kbar-Übergang wahrscheinlich $B_3 \rightarrow B_4$ (äußerer Ring)
 15 kbar-Übergang $B_4 \rightarrow$ unbekannt (innerer Ring)

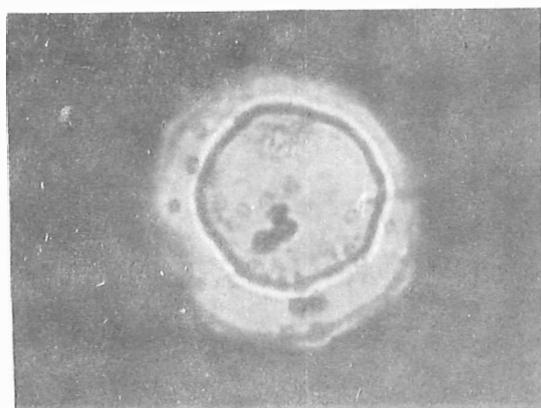


Abb. 3. KCl-Phasenübergang bei 18 kbar
 ($B_1 \rightarrow B_2$)



Abb. 4. AgCl-Phasenübergang bei
 90 kbar ($B_1 \rightarrow B_2$)

Den dazugehörenden Druckwerten werden die entsprechenden Skalenwerte einer Meßuhr zugeordnet, die über einen Meßfühler den Vortrieb der Schraubspindel anzeigt. Auf diese Weise kann eine Druckeichkurve aufgestellt werden, mit deren Hilfe eine grobe Druckeinstellung der Kammer vorgenommen werden kann.

Abb. 5 zeigt eine solche Druckeichkurve, wobei Kurve 1 den Beginn der Phasenumwandlung zeigt und Kurve 2 dem effektiv angelegten Druck entspricht. Die gezeigte Kurve wurde mit Hilfe von 10 bekannten Phasenumwandlungen erstellt. Die untere Kurve wurde errechnet.

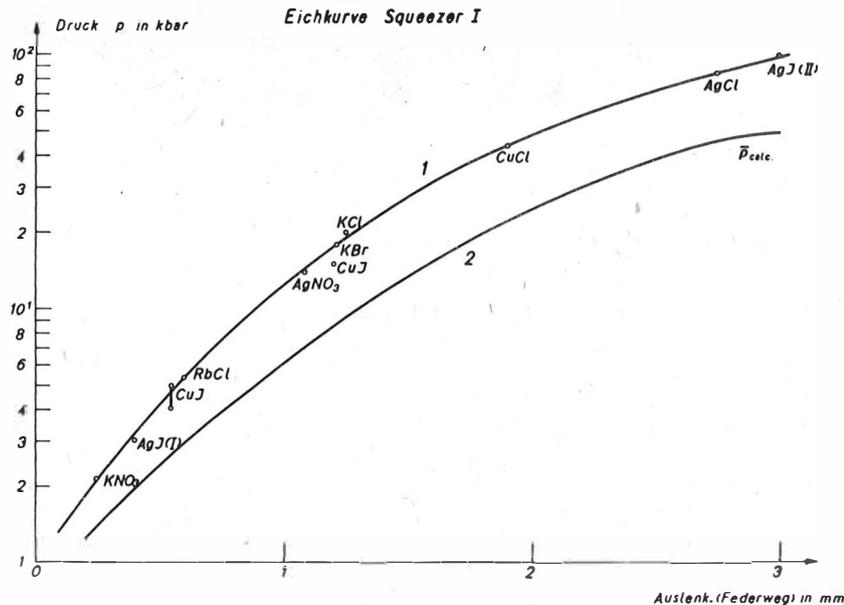


Abb. 5. Optische Druckeichkurve (indirekte Eichung)
1 - Zentrumsdruck; 2 - angelegter (effektiver) Druck

2.2. Leistungsfähigkeit der Apparatur

Bevor auf die ersten Ergebnisse näher eingegangen werden soll, müssen noch einige Bemerkungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit einer Diamant-Doppelstempelapparatur, die für Röntgenstrukturuntersuchungen eingesetzt wird, angeführt werden. Unbestreitbare Vorteile des "Squeezers" sind seine Handlichkeit (die Apparatur ist sehr klein), problemlose Kalibrierung und die Möglichkeit, mit relativ geringem Aufwand Drücke bis 100 kbar erzeugen zu können. Daneben treten aber eine Reihe von Problemen auf, die speziell beim Einsatz in der Röntgentechnik beachtet werden müssen, wenn man auswertbare Beugungsdiagramme erhalten will. Diese Probleme haben bei mikroskopischen und spektroskopischen Untersuchungen nicht in jedem Fall diese Bedeutung. Folgendes muß beachtet werden:

- Der Druckgradient über der gesamten Druckfläche ist recht groß. Im Zentrum herrschen etwa 3 - 4 mal so große Drücke wie am Rand. Das kann dazu führen, daß auf einem Beugungsdiagramm mehrere Phasen nebeneinander aufgezeichnet sind.
- Zwischen den Stempelflächen verbleibt nach Anlegen des Druckes nur sehr wenig Probenmaterial. Bei kristallinen Stoffen mit einer hohen Belastungsdichte der wich-

tigen Gitterebenen (Metalle, Alkalihalogenide) wirkt sich diese Tatsache nicht sehr störend aus. Bei einer Vielzahl von Silikaten oder Oxiden aber führt das zu relativ langen Belichtungszeiten, was die Qualität der Diagramme beeinträchtigt.

- Als Aufnahmetechnik wird das LAUE Durch- und Rückstrahlverfahren angewendet, also eine Registrierung auf ebenen Filmen. Der zur Verfügung stehende Winkelbereich liegt beim derzeit angewendeten Konstruktionsprinzip der Druckzelle im Durchstrahlbereich bei $\vartheta = 7 - 15^\circ$, d.h. für MoK α -Strahlung ein d-Wertbereich von 1,8 - 4,0 Å und für CuK α -Strahlung von 4,0 - 8,8 Å. Im Rückstrahlbereich sind die erfaßbaren d-Werte noch kleiner. Wir erfassen deshalb zur Zeit also nur wenige Reflexe mit meist relativ geringer Intensität. Speziell zu diesem Problem werden gegenwärtig einige andere Konstruktionsvarianten getestet mit dem Ziel, auch die Reflexe zu erfassen, die bei kleineren d-Werten auftreten.

3. Ergebnisse

Zu den interessantesten Stoffen für die geophysikalische Erforschung, besonders der Mantel/Kern-Region der Erde, gehören die Sulfide, Selenide und Telluride der 3d-Übergangsmetalle. Für die röntgenografischen Hochdruckuntersuchen eignen sich besonders die Verbindungen mit kubischer Kristallstruktur. So wurde von uns unter anderem Mangansulfid (MnS) bei Drücken bis 100 kbar untersucht. Parallel zur Röntgenbeugung wurde das Mangansulfid in der gleichen Hochdruckapparatur lichtoptisch mit einem Polarisationsmikroskop untersucht. In den unteren Druckbereichen treten keine relevanten strukturellen Veränderungen auf. Erst bei etwa 100 kbar ist ein Effekt zu beobachten, der aber nicht eindeutig als Phasenübergang bezeichnet werden kann. Das Mikroskop zeigt im weißen Licht einen Farbumschlag von Gelb nach Rot an. - Im Gegensatz zu den vorher gezeigten Phasenumwandlungen handelt es sich beim Mangansulfid nur um eine Verschiebung der Absorptionsverhältnisse wie sie ähnlich bei Talliumbromid (TlBr) von DRICKAMER [2] 1961 beobachtet wurde und auch beim Schwefel vorkommt, hier allerdings bei noch höheren Drücken. Bestätigt wird dieser Effekt durch die Röntgenbeugungsuntersuchungen bei 100 kbar. Er äußert sich durch eine Verbreiterung des (220)-Reflexes. - Mangansulfid hat eine kubische Struktur vom NaCl-Typ mit vorherrschend ionarer Bindung. Dieser Phasenübergang kommt wahrscheinlich dadurch zustande, daß das kubische Gitter tetragonal verzerrt wird und sich damit ein Gitter mit niederer Symmetrie einstellt. Es tritt hier aber noch keine neue Phase im eigentlichen Sinne auf, denn dafür wären Ionenumordnungen im größeren Umfang erforderlich. Die Koordinationszahlen verändern sich wahrscheinlich nicht. In Abb. 6 ist das Verhältnis von a/a_0 von Mangansulfid in Abhängigkeit vom Druck dargestellt. Untersucht wurde der (220)-Reflex. Unsere Untersuchungen bestätigen diese Ergebnisse. Die Drucksteigerung bewirkt eine partielle Verschiebung der Valenzelektronen, was sich auch im Absorptionsverhalten und der elektrischen Leitfähigkeit auswirkt. Die Verschiebung der Valenzelektronen vom Anion zum Kation führt zur Lockerung und Umverteilung der Bindungselektronen im Kristallgitter. Der Bindungszustand wird somit von der vorwiegend ionaren Bindung in eine mehr unpolare Bindungsart mit ebenfalls vergrößertem metallischen Anteil verändert.

Wie bereits erwähnt, eignet sich der "Squeezer" wegen des relativ kleinen zur Verfügung stehenden Winkelbereiches nicht sehr gut für die Untersuchung silikatischer Strukturen mit relativ geringer Belastungsdichte der Gitterebenen. Als Beispiel da-

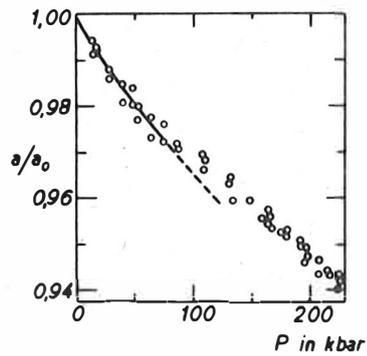


Abb. 6. a/a_0 - Abhängigkeit vom Druck für MnS
berechnet aus dem (220) - Reflex nach
DRICKAMER [2]

o experimentelle Werte
- - - theoretisch ermittelte Werte

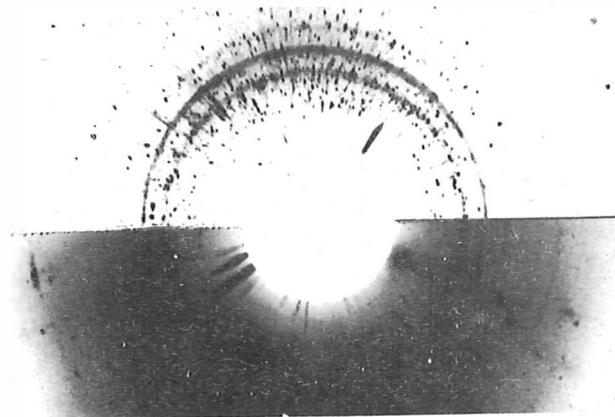


Abb. 7. Anorthit (Vesuv) bei 0 kbar (unten) und ≈ 80 kbar (oben)

für die Beugungsaufnahme eines Anorthits bei Normaldruck - untere Bildhälfte - und bei etwa 80 kbar - obere Bildhälfte (Abb. 7). Im untersuchten Druckbereich konnten keine größeren Effekte beobachtet werden. Bei photometrischer Vermessung der Beugungsreflexe deutet sich eine Linienverbreiterung einzelner Reflexe an, die aber wahrscheinlich auch nur auf relativ geringe Gitterverzerrungen zurückzuführen ist.

4. Zusammenfassung

Da Phasenumwandlungen mit starker d-Wert-Änderung nur in recht seltenen Fällen auftreten, kommt es in erster Linie darauf an, bei der Untersuchung des Hochdruckverhaltens von Substanzen kleinste d-Wert-Änderungen zu registrieren, um mechanische Parameter daraus zu gewinnen. Als Hauptschwierigkeiten treten dabei der noch zu geringe Streuwinkelbereich und der hohe Druckgradient in der Probe auf. Beiden ist jedoch zu begegnen. Der Druckgradient läßt sich einmal durch eine verbesserte Dichtung (PIERMARINI [5]) oder durch Verwendung kleinerer Kollimatoren, was jedoch zu einem rapiden Ansteigen der Belichtungszeit führt, verringern. Der Streuwinkelbereich soll durch eine Konstruktionsvariante vergrößert werden.

Literatur

- [1] WEIR, C.E.;
van VALKENBURG, A.;
LIPPINCOTT, E. Optical Studies at High Pressures Using Diamond Anvils. in: Modern Very High Pressure Technique. Ed. by R.F. Wentorf. London 1962, S. 51-69
- [2] DRICKAMER, H.G. The Lattice Parameters of MnO and MnS under High Pressure. J. Chem. Phys. 44 (1965), S. 4223
- [3] DECKER, D.L. Equation of State of Sodium Chloride. J. appl. Phys. 37 (1966), S. 5012
- [4] DECKER, D.L. High Pressure Equation of State for NaCl, KCl and CsCl. J. appl. Phys. 42 (1971), S. 3239
- [5] PIERMARINI, J. Hydrostatic limits in liquids and solids to 100 kb. J. appl. Phys. 44 (1973), S. 5377

Die Geschwindigkeit elastischer Wellen in einigen gesteinsbildenden
Mineralien bei Drücken bis 15 kbar

von

E.I. BAJUK, M.P. VOLAROVIČ, G.A. ĚFIMOVA ¹⁾

Bei Gesteinen liegen bereits viele Versuchsdaten über die Geschwindigkeiten von Longitudinal- und Transversalwellen bei hohen Drücken vor [1-5]. Bei Mineralien gibt es dagegen sehr wenige Angaben [6-10]. Da die Mineralien anisotrop sind, müssen ihre elastischen Eigenschaften in den verschiedenen kristallografischen Richtungen untersucht werden.

Bemerkt werden muß, daß die Anisotropie der Geschwindigkeiten elastischer Wellen in Gesteinen [11] durch viele Faktoren bestimmt wird, von denen die wichtigsten die Mineralzusammensetzung und die Orientierung der Minerale sind, die die Komponenten des zu untersuchenden Gesteins darstellen. Ist die räumliche Verteilung der Geschwindigkeit in Mineralien unter den Bedingungen bekannt, die den realen Lagerungsbedingungen am nächsten kommen, dann können die Ergebnisse seismischer Beobachtungen sicherer interpretiert werden; außerdem kann dies eine wichtige Rolle bei der Ermittlung der Bereiche von Spannungskonzentrationen spielen [12, 13]. Die Beziehung zwischen dem inneren Bau der Minerale und der Geschwindigkeit elastischer Wellen wurde bei atmosphärischem Druck [14, 15] untersucht. Bei hohem Druck sind die Angaben über die Geschwindigkeit sogar in einzelnen Richtungen bei Mineralien äußerst begrenzt [6-10].

In dieser Arbeit werden die Geschwindigkeiten elastischer Longitudinalwellen v_p in den verschiedenen kristallografischen Richtungen der Minerale bei hohen Drücken untersucht. Für den Versuch wurden Einkristalle von natürlichen gesteinsbildenden Mineralien einiger Gruppen der Silikatklasse und Kalzit ausgewählt. Von den Gerüstsilikaten wurden Quarz und Nephelin, von den Kettensilikaten - Pyroxene (Klinopyroxene: Ägirin und Hedenbergit) und Amphibole (Hornblende) und von den Silikaten mit isolierten SiO_4 -Gruppen Beryll untersucht.

Die Versuche wurden mit dem Ultraschallimpulsverfahren bei 1,8 MHz in einer Hochdruckanlage vorgenommen, in der Blei das druckübertragende Medium war [16, 17]. Untersucht wurden Proben von 20 mm Länge und 17,5 mm Durchmesser. Die Minerale wurden nach äußeren morphologischen Merkmalen mit $\pm 1^\circ$ Genauigkeit orientiert.

Bekanntlich besteht das Quarzgitter aus einem endlosen dreidimensionalen SiO_4 -Tetraedergerüst, das kein Kation besitzt, wodurch das Gefüge gefestigt wird. Die elastischen Eigenschaften des Quarzes werden allein durch die Stabilität des Gerüsts selbst bestimmt, deshalb ist keine hohe Geschwindigkeitsanisotropie zu erwarten. Bei der Messung der Geschwindigkeit von Longitudinalwellen in den drei kristallo-

¹⁾ Institut Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Moskau D-242, B. Gruzinskaya 10

grafischen Hauptrichtungen in einem künstlichen Quarzkristall wurde diese Annahme bestätigt (Abb. 1). Der größte Geschwindigkeitsunterschied wurde zwischen den Richtungen [001] und [100] bei 15 kbar beobachtet, er betrug 13,8 %. Die Geschwindigkeitsanisotropie ging in den anderen Richtungen nicht über 7 % hinaus. Außerdem wurde festgestellt, daß die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen v_p in Richtung der kristallografischen z-Achse (um 7,5 % bei 15 kbar) etwas mehr zunimmt als in den übrigen Richtungen (um 4 % bei 15 kbar). Dies stimmt mit den Ergebnissen bei der Untersuchung der Geschwindigkeit v_p in einem Quarzkristall bis 4 kbar überein [18].

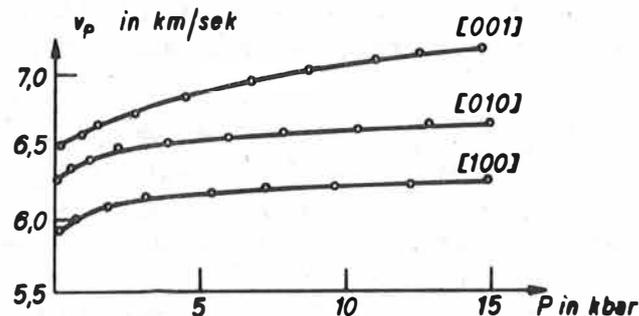


Abb. 1. Abhängigkeit der Longitudinalwellengeschwindigkeit vom Druck für drei kristallographische Hauptrichtungen im Quarz

Bei einem Druck über 4 kbar trägt die Abhängigkeit v_p vom Druck den gleichen fast linearen Charakter wie in dem Druckintervall 2 - 4 kbar, d.h. nach Beseitigung der Porosität und Mikrorißbildung. Bemerkenswert ist, daß bei natürlichen Kristallen die Geschwindigkeit v_p in allen Richtungen niedriger ist als bei künstlichen Kristallen.

In einem Nephelinkristall (Ural, Višnevye gory) wurde eine große Geschwindigkeitsanisotropie der Longitudinalwellen von 3,2 - 9,2 km/s beobachtet [19]. Dabei entspricht die größte Geschwindigkeit der größten Netzebenenendichte des Minerals. In Abb. 2 ist das Nephelengefüge bei Projektion auf die Ebene (0001) und das Diagramm der Verteilung der Geschwindigkeitswerte in der Ebene (0001) gezeigt. Wie aus dem Abb. ersichtlich ist, wurden die größten Geschwindigkeitswerte in der Richtung registriert, die der Ausdehnungsrichtung der Kieselsäurestruktur, d.h. der Ausdehnungsrichtung der Sechseringe entspricht, die aus Kieselsäuretetraedern aufgebaut sind. Die isolierten Ringe werden durch Na-Oktaeder und Al-Tetraeder verbunden. Bei Druckerhöhung auf 15 kbar wurden Nephelinproben untersucht, die aus diesem Kristall entnommen wurden. Die Geschwindigkeiten in Richtung der 6zähligen Achse und in Richtung der Sechseringe nahmen bei 15 kbar um 23 % bzw. 32 % zu, in der Richtung $[11\bar{0}0]$ dagegen nur um 7 %. Dieser Unterschied in der Änderung der Geschwindigkeit in den verschiedenen Richtungen des Nephelinkristalls bei Druckeinwirkung läßt sich auf die unregelmäßige Anordnung der Ringe aus SiO_4 -Tetraedern entlang der 6zähligen Achse zurückführen.

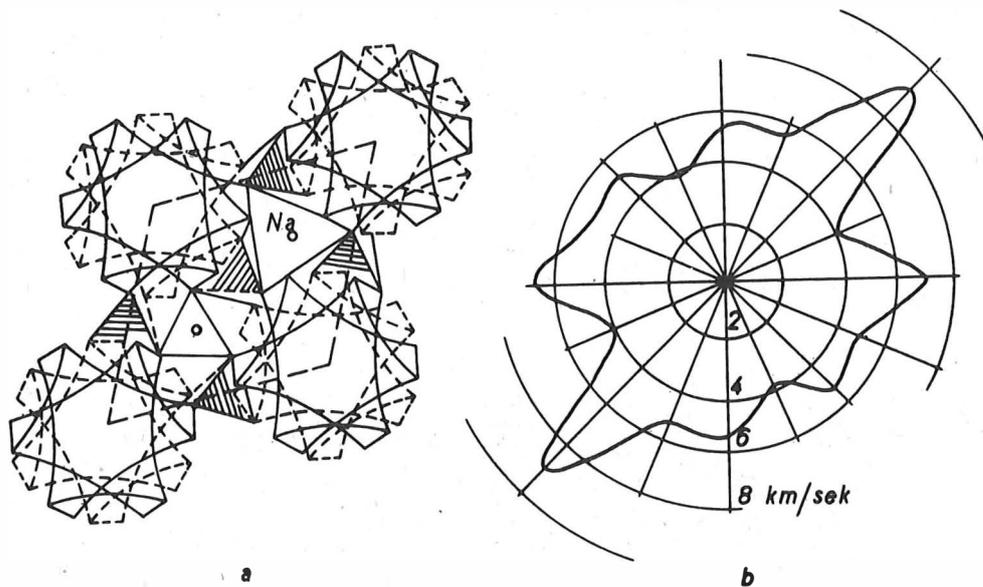


Abb. 2. Kristallstruktur von Nephelin in der Ebene $[0001]$.
Ausbreitung der Longitudinalwellengeschwindigkeit
in der Ebene $[0001]$

In dem Hornblendekristall 2972 aus Jakutien wurden die Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen in drei kristallografischen Richtungen gemessen: längs der kristallografischen Achse $c - [001]$ und in den Richtungen, die senkrecht zu den zwei Spaltflächen $[110]$ und $[\bar{1}\bar{1}0]$ verlaufen. Dazu wurden aus einem Kristall drei Proben hergestellt, von denen die eine, die in der Richtung $[\bar{1}\bar{1}0]$ entnommen wurde, poröser als die anderen zwei war. Der größte Geschwindigkeitswert wurde in der Richtung $[001]$ erzielt (Abb. 3), die der Ausdehnungsrichtung der Kieselsäurestrukturen, d.h. der Ausdehnung der Doppelketten der SiO_4 -Tetraeder entspricht. Die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen in den anderen beiden Richtungen ist bei hohen Drücken etwa gleich, und der niedrigere Wert der Geschwindigkeit in der Richtung $[\bar{1}\bar{1}0]$ bei einem Druck bis 2 kbar ist auf die erhöhte Porosität und Mikrorißbildung der Probe zurückzuführen. Geht man von dem Amphibolgefüge aus, so dürften sich die Geschwindigkeiten in diesen Richtungen ebenfalls nicht unterscheiden. Es wurde eine fast einheitliche relative Geschwindigkeitsänderung in den untersuchten Richtungen in dem Hornblendekristall bei Druckeinwirkung beobachtet. Bekanntlich besetzen die zusätzlichen Kationen Na^+ und K^+ im Amphibolgefüge Gitterlücken in großen Hohlräumen. Unter der Druckeinwirkung wird das Gefüge durch die großen Hohlräume in den Richtungen verdichtet, die parallel zu den Doppelketten oder senkrecht zu ihnen verlaufen. Deshalb ist gerade in diesen Richtungen eine größere Geschwindigkeitsänderung bei Druckeinwirkung zu verzeichnen. In den Richtungen, die schiefwinklig zur Ausdehnung der Ketten verlaufen, ist eine geringere Änderung von v_p bei Druckeinwirkung zu erwarten.

Von den Klinopyroxenen sind die Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen in Ägirin in der Richtung $[001]$ und in Hedenbergit in der Richtung $[010]$ angeführt (Abb. 4).

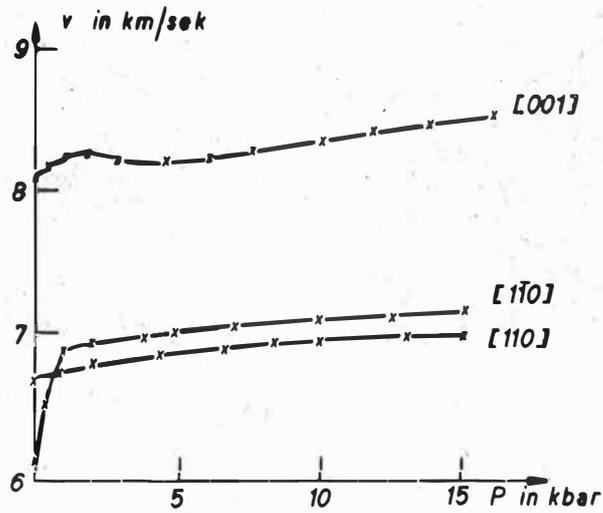


Abb. 3. Abhängigkeit der Longitudinalwellengeschwindigkeit vom Druck für den Hornblendekristall Nr. 2972 aus Jakutien

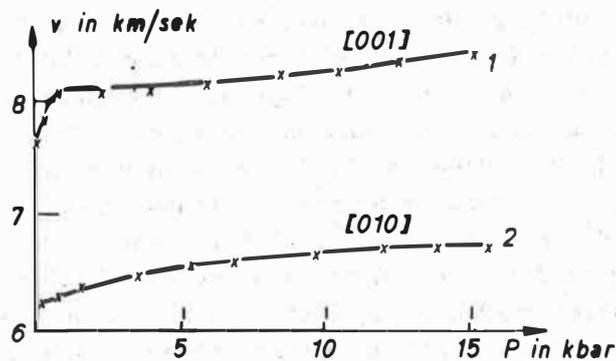


Abb. 4. Abhängigkeit der Longitudinalwellengeschwindigkeit vom Druck in 1 - Ägirin und 2 - Hedenbergit

Die Klinopyroxene gehören zum monoklinen Kristallsystem. Die wichtigste kristallografische Charakteristik ihres Gefüges sind einfache Ketten aus SiO_4 -Tetraedern mit dem Radikal $[\text{Si}_2\text{O}_6]$, die durch kontinuierliche Gebilde aus Kationenoktaedern mit der gleichen Ausdehnungsrichtung verbunden sind. Die physikalischen Eigenschaften einzelner Klinopyroxene werden durch ihre Kationenzusammensetzung bestimmt. In diesem Zusammenhang haben Minerale, die Eisenkationen enthalten, bekanntlich die größte Dichte. Die Geschwindigkeit muß jedoch bei Austausch der Eisenkationen gegen Magnesiumkationen und noch mehr beim Auftreten von Aluminiumkationen im Gitter ansteigen. Folglich ist die Durchschnittsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen in Diopsid größer als in Ägirin und Hedenbergit, und in Jadeit und Spodumen müßte sie größer sein als in Diopsid. Auf der Grundlage der Kationenzusammensetzung kann angenommen werden, daß die Geschwindigkeit v_p in derselben Richtung in Ägirin und Hedenbergit ähnliche Werte hat. Diese Minerale mit der chemischen Formel $\text{NaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ und $\text{CaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ haben einen fast gleichen Dichtewert von $3,55 \text{ g/cm}^3$. Die größten Geschwindigkeitswerte sind in der Richtung $[001]$ (Abb. 4), d.h. in der Ausdehnungsrichtung der SiO_4 -Tetraeder anzutreffen. In den Richtungen $[100]$ und $[010]$ der kristallografischen Achsen a und b unterscheiden sich die Bindungskräfte wenig voneinander und die Geschwindigkeitswerte sind annähernd gleich.

Bei Beryll ist, wenn man die kristallografische Mineralstruktur berücksichtigt, keine hohe Anisotropie der Geschwindigkeit von elastischen Wellen zu erwarten. Die einfachen Sechseringe in der Beryllstruktur haben sowohl in der senkrechten Richtung als auch in der Ringebene die gleiche Verbindung. Wie die Messungen in einem Beryllkristall in den Richtungen $[0001]$ und $[10\bar{1}0]$ zeigten (Abb. 5), betragen die Geschwindigkeitswerte der Longitudinalwellen bei atmosphärischem Druck tatsächlich $8,8 \text{ km/s}$ bzw. $8,2 \text{ km/s}$, d.h. es ist keine große Anisotropie zu verzeichnen. Bei einer Druckeinwirkung bis 2 kbar steigen die Geschwindigkeitswerte um 12 %, was auf eine starke Ribildung zurückzuführen ist. Bei höheren Drücken können in Beryll gewisse Anomalien in der Geschwindigkeit der Longitudinalwellen beobachtet werden; die wahrscheinlich mit polymorphen Umwandlungen im Zusammenhang stehen.

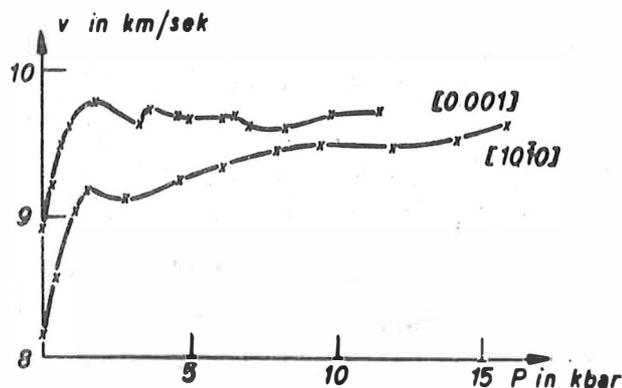


Abb. 5. Abhängigkeit der Longitudinalwellengeschwindigkeit vom Druck für zwei Richtungen in einem Beryllkristall

Im Kalzitgitter CaCO_3 bilden die Sauerstoffatome ebene Dreiecke mit Kohlenstoffatomen in der Mitte. Die senkrecht zur Achse c des Kalzits angeordneten ebenen CO_3 -Gruppen müssen eine starke Anisotropie der Eigenschaften des Minerals bedingen. Die Untersuchung einiger Kalzitkristalle bei atmosphärischem Druck zeigte, daß die kleinsten Geschwindigkeitswerte der Longitudinalwellen (5,53 km/s bei $p = 1$ at) in Richtung der 3zähligen Achse $[0001]$ und die größten in der Richtung $[\bar{1}2\bar{1}0]$ zu beobachten waren, d.h. in der Ausdehnungsrichtung der ebenen CO_3 -Gruppen. An den Seiten des Rhomboeders $[\bar{1}0\bar{1}1]$ und an den Diagonalen $[10\bar{1}0]$ wurden Zwischenwerte für v_p festgestellt (6,3 - 7,4 km/s). Bei hohem Druck bis 15 kbar wurden Proben untersucht, die in den Richtungen $[0001]$, $[\bar{1}2\bar{1}0]$ und $[\bar{1}0\bar{1}1]$ gemessen wurden (Abb. 6). Unter der Druckwirkung stieg die Geschwindigkeit vor allem in der Richtung $[\bar{1}0\bar{1}1]$ (um 15 % bei 15 kbar). Wahrscheinlich bilden sich in diesem Fall Gleitwillinge, wodurch das Gefüge verdichtet und folglich die Geschwindigkeit erhöht wird. Die Berechnung der elastischen Konstante c_{33} aus den Geschwindigkeitswerten der Longitudinalwellen in Richtung der kristallografischen Hauptachse ergibt ein Maximum bei 4,7 kbar.

p , kbar	0,5	2,0	3,0	4,7	6,0	10,0	15,0
$c_{33} \cdot 10^{11}$ dyn/cm ²	9,03	9,23	9,26	9,45	9,28	9,05	8,60

Dies stimmt mit den Angaben von DANDEKAR [21] für die Messung der Geschwindigkeit von Longitudinalwellen in dieser Richtung bei einem Druck bis 7 kbar überein.

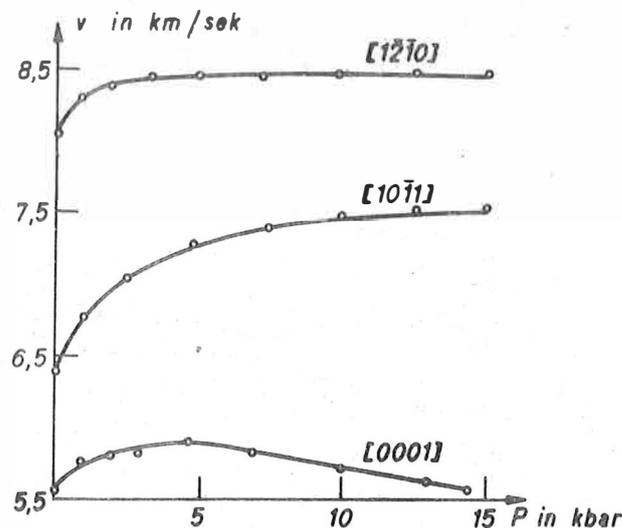


Abb. 6. Abhängigkeit der Longitudinalwellengeschwindigkeit vom Druck für einige Richtungen in einem Kalzitkristall

Gleichzeitig mit der Messung der Geschwindigkeit von elastischen Wellen wurde auch die Volumenkompression der Minerale $\Delta V/V$ ermittelt. Wie erwartet, verlaufen die Kurven der Abhängigkeit der Volumenkompression für Proben, die einem Kristall entnommen wurden, sehr ähnlich. Dies ist am Beispiel dreier Nephelinproben ersichtlich (Abb. 7).

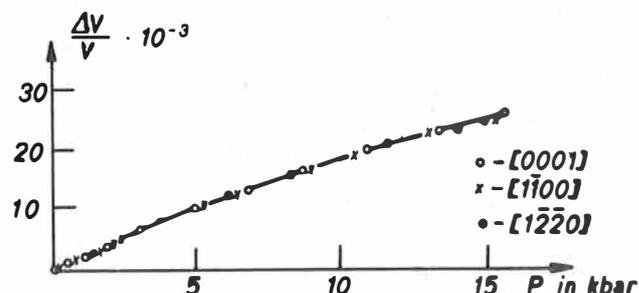


Abb. 7. Abhängigkeit der Volumenkompression vom Druck für einige Richtungen in Nephelin

Somit haben die Messungen der Geschwindigkeit von elastischen Wellen in Mineralen aus unterschiedlichen Klassen und Gruppen bei hohen Drücken gezeigt, daß die Anisotropie der Geschwindigkeiten der elastischen Wellen durch die Anisotropie der Mineralstrukturen bestimmt wird. Dabei ist die Tatsache, daß die größten Geschwindigkeitswerte der elastischen Wellen charakteristisch für die Richtungen mit dichter Packung sind, eine allgemeine Gesetzmäßigkeit. Unter der Druckeinwirkung steigt die Geschwindigkeit der elastischen Wellen in den drei Richtungen stark an, wo es Vakanzmöglichkeiten für die Gitterverzerrung ohne Lösen der Verbindungen gibt.

Literatur

- [1] VOLAROVICĚ, M.P. Issledovanie fiziko-mechaničeskich svojstv gornych porod pri vysokich davlenijach. Geologija i Geofizika (1961) 4, S. 13-21
- [2] Ėlektričeskie i mechaničeskie svojstva gornych porod pri vysokich davlenijach. Trudy Inst. Fiz. Zemli SSSR, Nauka, Moskva (1966) 37 (204)
- [3] Tektonofizika i mechaničeskie svojstva gornych porod. Nauka, Moskva 1971
- [4] LEBEDEV, T.S. u.a. Uprugie svojstva gornych porod pri vysokich davlenijach. Naukova dumka, Kiev 1972
- [5] BIRCH, F. Skorost' uprugich voln v gornych porodach do 10 kbar, in: Ultrazvuk v Geofizike. Mir, Moskva (1964), S. 263-271

- [6] AFANAS'EV, G.D. u. a. Issledovanie skorosti uprugich voln nekotorych porodoobrazujuščich mineralov pri vysokich davlenija do 20 kbar. Dokl. Akad. Nauk SSSR 201 (1971) 3, S. 586-589
- [7] TOMAŠEVSKAJA, I.S. Skorosti prodol'nych voln v nekotorych gornych porodach i mineralach Chibinskogo massiva pri trechosnom napražennom sostojanii, in: Fiziko-mechaničeskie svojstva gornych porod verchnej časti zemnoj kory. Nauka, Moskva (1966), S. 143-148
- [8] VOLAROVIČ, M.P.; LEVYKIN, A.I. Vlijanie davlenija do 40 kbar na uprugie svojstva nekotorych porodoobrazujuščich mineralov. Geofiz. Sb. Akad. Nauk ukr. SSR (1973) 54, S. 35-38
- [9] BAJUK, E.I. Uprugie svojstva mineralov pri vysokich davlenijach i temperaturach. Geofiz. Sb. Akad. Nauk ukr. SSR (1973) 51, S. 27-31
- [10] SIMMONS, G. The velocity of Compressional Waves in various Minerals at Pressure to 10 kbars. J. geoph. Res. 69 (1964) 6, S. 1117-1121
- [11] VOLAROVIČ, M.P. Issledovanie uprugich i pročnostnyh svojstv gornych porod pri vysokich davlenijach, in: Problemy mehaniki gornych porod. Nauka Kaz. SSR, Alma-Ata (1966), S. 103-106
- [12] REZANOV, I.A.; GALDIN, N.E. O geologičeskom značenii anizotropii sejsmičeskich skorostej v zemnoj kore. Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. geol. (1967) 4, S. 10-16
- [13] SILAJEVA, O.I.; BAJUK, E.I. O prirode anizotropii uprugich svojstv gornych porod; Izv. Akad. Nauk SSSR. Fiz. zemli (1967) 12, S. 22-29
- [14] BELIKOV, B.P.; ALEKSANDROV, K.S.; RYŽOVA, T.V. Uprugie svojstva porodoobrazujuščich mineralov i gornych porod. Nauka, Moskva 1970
- [15] SILAJEVA, O.I.; DELICIN, I.S. Skorost' prodol'nych voln v kristalle iskusstvennogo kvarca. Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. zemli (1970) 2,
- [16] VOLAROVIČ, M.P.; LEVYKIN, A.J.; GALDIN, N.E. Izučenie skorostej prodol'nych voln v obrazcoy gornych porod pri davlenijach do 20 000 kg/cm². Dokl. Akad. Nauk SSSR 157 (1964) 6, S. 1349-1351
- [17] VOLAROVIČ, M.P. Apparatura i metody issledovanija fizičeskich svojstv obrazcov gornych porod pri vysokich davlenijach, in: Unikal'nye pribory, Izv. SEV, Moskva (1970), S. 3-5
- [18] BAJUK, E.J.; DELICIN, J.S.; SILAJEVA, O.J. Vlijanie vsestoronnego davlenija na raspredelenie skorosti uprugich voln v kvarce, in: Fizičeskie svojstva gornych porod pri vysokich termodinamičeskich parametrah, Naukova dumka, Kiev (1971), S. 147-149
- [19] BAJUK, E.J.; VOLAROVIČ, M.P.; BIFIMOVA, G.A. Skorost' prodol'nych voln v različnyh kristallografičeskich napravlenijach nefelina pri vysokich davlenijach do 15 kbar, in: Fizičeskie svojstva gornych porod pri vysokich termodinamičeskich parametrah, Naukova dumka, Kiev (1971), S. 144-147

- [20] ALEKSANDROV, K.S.;
RYŽOVA, T.V. Uprugie svojstva porodoobrazujuščich mineralov, I.
Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. geofiz. Moskva (1961) 9,
- [21] DANDEKAR, D.P. Pressure Dependence of the Elastic Constants of
Calcite.
Phys. Rev. 172 (1968) 3, S. 873-877

Vorläufiges über die Untersuchungen des Montmorillonits
unter hohem Druck und Temperatur

von

O. TOMSCHEY ¹⁾

Im Hochdrucklabor des Geochemischen Forschungslaboratoriums der Ungarischen Akademie der Wissenschaften werden Tonminerale bei verschiedenen thermodynamischen Verhältnissen (Hochdruck und hohe Temperatur) untersucht. Unser Ziel ist es, die verschiedenen Umwandlungsprozesse dieser Mineralien zu studieren. Von den Tonmineralien wurden der Kaolinit und der Montmorillonit untersucht.

Wir haben schon 1972 darauf hingewiesen, daß die Umwandlung des Kaolinites unter hohem Druck bei viel niedrigeren Temperaturen stattfindet als bei 1 atm. Dementsprechende Untersuchungen sind nicht nur an Kaolinit, sondern auch an Montmorillonit durchgeführt worden, um die Umwandlungsprozesse dieser Mineralien zu studieren.

Die Versuchseinrichtungen waren dieselben, die wir früher bei der Untersuchung des Kaolinites verwendet haben. Die Hochdruckbomben wurden nach ROY und OSBORN gebaut [1 - 3].

Bei diesen Untersuchungen lag die Temperatur bei 550 °C. Der Druck der flüssigen Phase änderte sich von 0,5 bis 2,0 kbar, die Versuchsdauer lag bei 12 bis 24 und 48 Stunden. Die Temperatur wurde mit Thermoelementen (Ni-NiCr und Pt-PtRh) gemessen, wobei der Druck der flüssigen Phase nach G.C. KENNEDY berechnet wurde. Die Temperatur des Ofens konnte mit einer Stabilität von ± 5 °C, der Druck bei 0,5 kbar mit ± 10 bar und bei 1,0 und 2,0 kbar mit ± 20 bar gehalten werden. Bei diesen Druck- und Zeitverhältnissen sind weitere Untersuchungen im Gange bei verschiedenen Temperaturen. In diesem Artikel wird über Untersuchungen an Montmorillonit bei 550 °C, bei verschiedenen Drücken und unterschiedlicher Zeitdauer berichtet.

Die Untersuchungsergebnisse sind bisher nur qualitativ, was wie folgt erklärt werden kann: Die Umwandlungsprodukte wurden röntgendiffraktometrisch untersucht. Sie erwiesen sich aber als zu komplizierte Verbindungen, um eine quantitative Bestimmung zu ermöglichen. Die Veränderungen in dem röntgendiffraktometrischen Bild sind nicht absolut, sondern nur relativ, d.h. sie konnten nur untereinander verglichen werden. Unter diesem Gesichtspunkt kann nur eine mengenmäßige Abschätzung und Einordnung der Umwandlungsprodukte erfolgen. So können die Ergebnisse wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Der Montmorillonit ist bei 550 °C und 2,0 kbar bis 48 Stunden existenzfähig, d.h. nur ein bestimmter Teil des Montmorillonits wird abgebaut. Mit Zunahme des Druckes und der Versuchsdauer nimmt seine relative Menge ab.

¹⁾ Laboratorium für Geochemische Forschung der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest 8, Muzeum Körút 4/A

2. Die zwei SiO_2 -Modifikationen, der Christobalit und der Quarz kommen in den Endprodukten in verschiedenen Mengen vor, es muß aber bemerkt werden, daß bei einem Druck von 0,5 kbar die Menge des Christobalits größer als die des Quarzes ist. Bei höheren Drücken der flüssigen Phase und bei 48 Stunden ist aber die Menge des Quarzes immer größer (Tab. 1).

Tab. 1

Zeit [Stunden]	Druck [kbar]	Bestimmte Mineralien*
12	0,5	Ch - Q - M - Chl - In - Mu - A
24	0,5	Ch - Q - M - In - Mu - A - Plag
48	0,5	Ch - Q - In - Chl - Mu - M - Plag
12	1,0	Ch - Q - Chl - M - In
24	1,0	Ch - Q - In - M - Chl - Mu - A
48	1,0	Q - Ch - In - Chl - M
12	2,0	Ch - Chl - Q - Mu - In - A
24	2,0	Ch - Q - Chl - In - M - Mu
48	2,0	Q - Chl - In - M

* Abkürzungen: Ch = Christobalit; Q = Quarz; M = Montmorillonit;
Chl = Chlorit; In = Indialit; A = Andalusit-X;
Mu = Mullit; Plag = Plagioklas

Anordnung der Mineralien in quantitativer Reihenfolge

3. Ebenso wie beim Kaolinit, tritt der Andalusit-X auf, jedoch nur bei den Experimenten mit kürzerer Untersuchungsdauer. Zur Bestimmung dieses Minerals wurden die Daten von D.M. ROY benutzt.
4. Bemerkenswert ist die Bildung des Indialits. Dieses Mineral ist eine sich bei höheren Temperaturen bildende Art des Cordierits. Nach den Untersuchungsergebnissen beginnt aber seine Bildung unter hohem Druck bei weitaus niedrigeren Temperaturen. Auch das Vorkommen dieses Minerals konnte röntgendiffraktometrisch nachgewiesen werden. Bei niedrigeren Temperaturen wird wahrscheinlich nicht nur die γ - sondern auch die α -Modifikation vorkommen.
5. Auf Grund dieser Untersuchungen können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden: Bei der Metamorphose ist der Einfluß der Zeit bedeutend. Unter den gegebenen thermodynamischen Verhältnissen finden Umwandlungsvorgänge schon während einiger Tage statt. Die frühere Auffassung über die Dauer der Gesteinsmetamorphose (größenordnungsmäßig einige Millionen Jahre) muß korrigiert werden [2].

Weitere Untersuchungen müssen aber nicht nur in diesem (Hoch-) Temperaturbereich, sondern auch bei hydrothermalen Temperatur- und Druckbedingungen durchgeführt werden. Man kann annehmen, daß durch solche weiteren Experimente auch die Umwandlungsvorgänge des Montmorillonits geklärt werden können. Solche Untersuchungen sind teils im Gange, teils geplant.

Literatur

- [1] SZADECZKY-KARDOSS, E. u.a. On the Montmorillonite Facies.
Acta Geol. Acad. Sci. Hung. 12 (1968) 1-4, S. 61-65
- [2] SZADECZKY-KARDOSS, E. u.a. Experimental Simulation of Rock Metamorphism.
Acta Geol. Acad. Sci. Hung. 12 (1968) 1-4, S. 51-60
- [3] PESTY, L.
TOMSCHEY, O. Formation of Keatite and Andalusite-x as a Result
of the High PT Transformation of Kaolinite.
Acta Geol. Acad. Sci. Hung. 17 (1973) 1-3, S. 121-133
- [4] TOMSCHEY, O. Preliminary Report on the Investigation of Kaolinite
at Elevated Pressures and Temperatures.
Acta Geol. Acad. Sci. Hung. 17 (1973) 1-3, S. 135-140

Neue Methodiken und Geräte zur Laboruntersuchung der magnetischen Eigenschaften
von Gesteinen und Mineralien bei hohen Drücken und Temperaturen

von

T.S. LEBEDEV, B.J. SAVENKO, N.F. POZNANSKAJA, V.I. SHAPOVAL
V.A. KORČIN, V.T. LACHTANOV ¹⁾

Eine der wichtigsten Richtungen bei der Untersuchung der physikalischen Parameter einer Mineralsubstanz ist die Erforschung der ganzen Skala ihrer magnetischen Eigenschaften bei Einwirkung hoher Drücke (P) und Temperaturen (T).

In der Abteilung für physikalische Eigenschaften der Erdschubstanz des Institutes für Geophysik der Akademie der Wissenschaften der UdSSR wurden über mehrere Jahre Versuchsanlagen entwickelt und systematische Untersuchungen der magnetischen Eigenschaften von Gesteinen und Mineralien bei hohen P- und T-Bedingungen angestellt, wodurch gesetzmäßige Beziehungen zwischen den thermodynamischen Verhältnissen bei der Bildung einer Mineralsubstanz und ihren magnetischen Eigenschaften festgestellt und diese je nach der Lagerungstiefe in der Erdkruste charakterisiert werden können.

Bei der Untersuchung der Veränderungen der magnetischen Parameter bei gleichzeitiger Einwirkung hohen Druckes und hoher Temperatur wurde eine quasihydrostatische Druckanlage in Form einer Kolben-Zylinder-Apparatur mit äußerer Heizung angewendet [1]. Die äußere Heizung besteht aus einer bifilaren NiCr-Wicklung, durch die die ganze Anlage mit Probe auf 350 - 400 °C bei maximalem Druck von 5,0 - 5,5 kbar gleichmäßig erwärmt werden kann. Die Temperatur der Probe wird indirekt nach Eichkurven ermittelt, die die Temperaturverteilung an den Außenwänden der Kammer kennzeichnen. Der absolute Fehler bei der Temperaturbestimmung in der Kammer beträgt höchstens ± 5 °C. Der Druck wird über eine dünne Blei- oder Pyrophyllitschicht von den Kolben auf die Probe übertragen. Die Genauigkeit bei der Umrechnung des Pressendruckes auf die Kolbenfläche beträgt unter Berücksichtigung der entstehenden Reibung ± 2 %.

Untersucht wurde der bleibende Einfluß hoher Drücke und Temperaturen auf die magnetischen Eigenschaften von Proben mit unterschiedlicher natürlicher remanenter Magnetisierung (I_n) [2]. Die magnetischen Kennwerte wurden vor und nach dem Anlegen von 1,5 kbar Druck bei 100, 200 und 300 °C gemessen. Als Kriterium für die Stabilität von I_n gegenüber einer gleichzeitigen Einwirkung von P und T wurden die Werte der thermodynamischen Parameter angenommen, bei denen I_n durch die partielle remanente Magnetisierung (I_{rtp}) mit entgegengesetztem Vorzeichen vollständig ausgeglichen wurde. Dies wurde künstlich in einer Gesteinsschicht bei ihrem Erkalten in einem labor-

1) Geophysikalisches Institut der Ukrainischen Akademie der Wissenschaften, Kiev 68, Ul. Novo Beličanskaja

mäßigen Magnetfeld vorgenommen. Es wurde angenommen, daß der Zeitpunkt des Ausgleichs bei Proben unterschiedlicher Entstehung von I_n nicht gleich ist.

In Abb. 1 sind die Ergebnisse dieses Versuches aufgeführt. Bei einer Probe, deren Magnetisierung im wesentlichen aus der Viskosität resultiert, waren $T = 100\text{ °C}$ bei $P = 1,5\text{ kbar}$ ausreichend, damit die natürliche I_n durch I_{rtP} im Labor ausgeglichen wurde (Kurve 1). Anders war dies bei einer Probe, deren I_n thermoremanente Ursprungs ist. Nach der Einwirkung von $T = 300\text{ °C}$ und $P = 1,5\text{ kbar}$ behielt die Probe über 80 % ihrer ursprünglichen I_n (Kurve 2). Die Kurven 3 und 4 dieser Abb. charakterisieren diesen Prozeß bei Proben, deren natürliche remanente Magnetisierung die Vektorsumme aus der viskosen (nI_{rv}) und thermoremanente Magnetisierung (mI_{rt}) ist. Bei diesen Gesteinsarten hängt die Geschwindigkeit der Verringerung von $I_n = f(P, T)$ von den Komponenten n und m ab, und der Zeitpunkt des Ausgleichs von I_n wird von den Temperaturverhältnissen bei ihrer Entstehung bestimmt. Somit ist aus den ermittelten Werten ersichtlich, daß der Effekt der gleichzeitigen Einwirkung von T und P bei Proben mit unterschiedlicher Art der natürlichen Magnetisierung I_n differiert. Die festgestellte Abhängigkeit zwischen der Art der Magnetisierung und dem Zerstörungsgrad bei der Einwirkung von P und T ist besonders wichtig für die Festlegung des Drucks und der Temperatur, die während des Entstehungsprozesses der Gesteinsart herrschten.

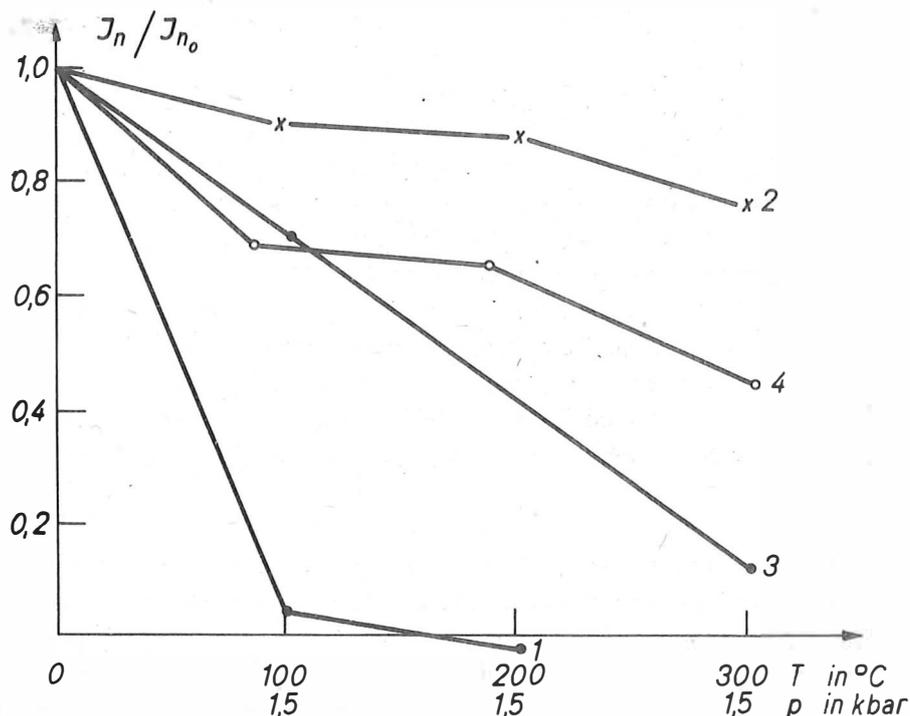


Abb. 1. Die Ergebnisse der Einwirkung hoher Drücke und Temperaturen auf die magnetischen Eigenschaften von Granitproben mit unterschiedlicher Art der natürlichen remanenten Magnetisierung.

1 - mit viskoser remanenter Magnetisierung (I_{rv}); 2 - mit thermoremanenter Magnetisierung (I_{rt}); 2 und 4 - mit remanenter Magnetisierung, dargestellt durch die Vektorsumme nI_{rv} und I_{rt}

Weiten Raum nimmt in unseren experimentellen Forschungen die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Gesteinsarten und Mineralien bei hydrostatischen Drücken ein. Abb. 2 zeigt die Anlage zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Gesteinsarten bei einem hydrostatischen Druck bis 2,5 kbar [3]. Das Grundelement der Anlage ist die Hochdruckkammer (1), die aus nichtmagnetischen Werkstoff hergestellt ist. Sie besteht aus einem dickwandigen Zylinder, in dessen oberem Teil eine Verschlussvorrichtung angeordnet ist. Die Länge des Arbeitsraumes der Kammer beträgt 45 mm, der Durchmesser 35 mm. Die Kammer wird nach dem Prinzip nichtkompensierter Flächen abgedichtet. Als Dichtungsmittel wird ein System von ölbeständigen Gummi- und Messingringen verwendet, die für 100 Meßzyklen verwendet werden können. Auf Grund der besonderen Bauart der Kammer kann sie bei hohem Druck jeweils um 180° um die waagerechte Achse gedreht werden.

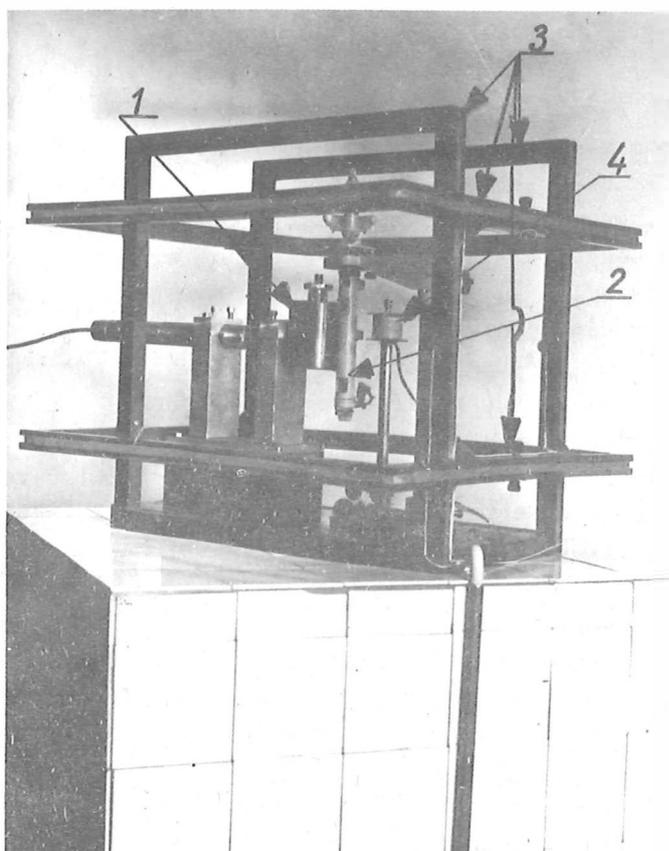


Abb. 2. Hydrostatische Hochdruckanlage und Meßgeräte für die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Gesteinsarten und Mineralien

Der Druck in der Kammer wird mit Hydrauliköl einer Pumpenanlage erzeugt. Der Druck im Arbeitsmedium wurde bei einer Genauigkeit von $\pm 0,05$ kbar mit einem genormten Federmanometer (bis 4,0 kbar) gemessen. Die Veränderung der magnetischen Kennwerte bei Messungen an Proben (22 x 22 x 22 mm) zwischen zwei Magneten astatischer Anordnung wurde mit dem Magnetometer MA-21 registriert (2), das in unmittelbarer Nähe der Kammer angeordnet wurde. Das Magnetometer und die Hochdruckkammer werden in der Spulenordnung nach HELMHOLTZ angebracht (3). Dadurch kann die Veränderung der magnetischen Eigenschaften der Gesteinsarten bei hydrostatischem Druck unter der Einwirkung homogener Magnetfelder unterschiedlicher Stärke untersucht werden. In der Anlage ist eine Ausgleichsspule (4) vorgesehen, die es ermöglicht, in einem labormäßigen Magnetfeld die magnetischen Kennwerte nach dem Nullverfahren zu messen. Die Skalenteilung des Gerätes betrug für zylindrische Proben bei der Messung der remanenten Magnetisierung 7,5 γ /Strich und bei der magnetischen Suszeptibilität 39 γ /Strich.

Einige Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Veränderung der remanenten Magnetisierung von Gesteinen bei einem hydrostatischen Druck bis 2,5 kbar sind in den Abbildungen 3, 4 und 5 aufgeführt.

In Abb. 3 sind die Kennlinien der Sättigungsmagnetisierung $I_{rs} = f(P)$ bei Einkristallen natürlichen Magnetits abgebildet. Der Wert der remanenten Sättigungsmagnetisierung (I_{rs}) der Einkristalle verringert sich mit Erhöhung des Drucks in unterschiedlichem Maße, was im wesentlichen auf die unterschiedliche Härte des magnetischen Materials zurückzuführen ist. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der Messung der Koerzitivkraft (H_c) der untersuchten Kristalle bestätigt. Je höher der Wert von H_c und je größer die magnetische Härte des Kristalls sind, desto stabiler gegenüber der Druckeinwirkung ist seine I_{rs} , d.h. desto weniger verändert sie sich. Die Zunahme der magnetischen Härte der Einkristalle des Magnetits führen wir auf Spurengehalte von Titan, Magnesium, Mangan und ihrer Oxide zurück, die das Gefüge des stöchiometrischen Magnetitgitters verändern. Die irreversible hyperbolische Verminderung der remanenten Magnetisierung ferromagnetischer Kristalle bei Druckerhöhung ist auf die vergrößerte Versetzungszahl und Diffusionsgeschwindigkeit zurückzuführen.

Die hyperbolische Verminderung der remanenten Magnetisierung von Gesteinsarten bei erhöhtem Druck wird durch einen kleineren Wert des Krümmungsradius im Vergleich zu Ein- und Vielkristallen des Magnetits gekennzeichnet (Abb. 4). Der Grad der Veränderung von I_{rs} bei hohen Drücken wird durch Veränderungen der Domänenstruktur und inneren Spannungen der Gesteinsarten bestimmt. Beim Zusammendrücken des Gesteins wird die Bewegung der Blochwände durch äußere Spannungen und Versetzungen gebremst, gleichzeitig wird die Drehbewegung der Vektoren der spontanen Magnetisierung einzelner Domänen verstärkt [4]. Wahrscheinlich bedingen gerade diese Erscheinungen die starke Verminderung der remanenten Magnetisierung bei anfänglicher Druckerhöhung auf 0,5 kbar für Einkristalle des Magnetits und auf 1,2 kbar für magnetische Gesteine. Bei weiterer Kompression nimmt I_{rs} infolge eines bestimmten Ausgleichs der inneren physikalischen Prozesse langsam ab. Mehrmalige Zu- und Abnahme von Druck (Zyklen) führt zu einem Verschwinden der reversiblen Veränderung der isothermen remanenten Magnetisierung und zu einer Stabilisierung der inneren Spannungen.

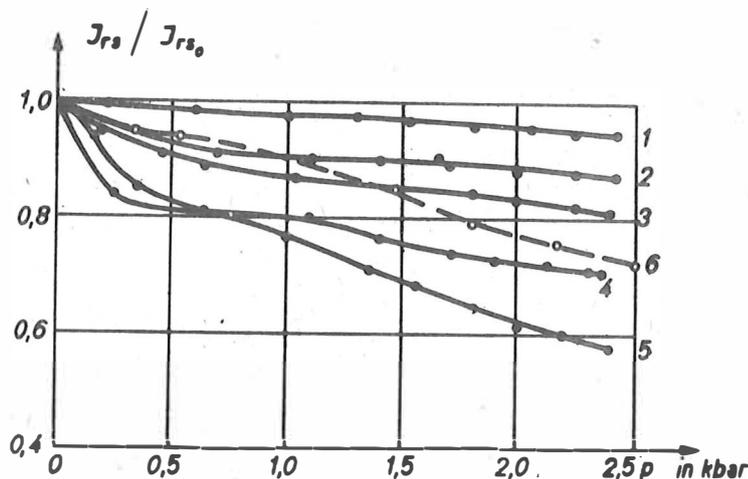


Abb. 3. Kurvenbild $I_{rs} = F(P)$ von natürlichen Einkristallen des Magnetits
 a - Kristall mit $H_c = 30$ Oe; 2 - Kristall mit $H_c = 20$ Oe;
 3 - Kristall mit $H_c = 19$ Oe; 4 - Kristall mit $H_c = 15$ Oe;
 5 - Kristall mit $H_c = 9$ Oe; 6 - rechnerische Kurve

Die Ergebnisse der Untersuchungen der remanenten Sättigungsmagnetisierung (I_{rs}) an Proben einiger metamorpher und Eruptivgesteine des Ukrainischen Schilds bei hohen Drücken (P) sind in Abb. 4a gezeigt. Die Kurven 1 - 5 kennzeichnen die Abhängigkeit $I_{rs} = f(P)$ von Diabas, Granosyeniten, Gneis und Diabasporphyrit. Die Stabilität der remanenten Magnetisierung gegenüber einer Druckeinwirkung wird nicht so sehr vom Grad der Basizität des Gesteins als vom Wert der Koerzitivkraft der ferromagnetischen Stoffe bestimmt, auf die neben der durchschnittlichen chemischen Zusammensetzung auch Größe und Form der Körner, Spannungen, Störungen im Kristallgitter und das Auftreten verschiedener Inhomogenitäten starken Einfluß ausüben. Beim Eruptivgestein, das sich aus Hochtemperaturphasen gebildet hat, hängt dieser Parameter auch von den physikalischen Bedingungen ab, die bei seiner Erstarrung vorherrschten, insbesondere von der Erstarrungsgeschwindigkeit. Folglich bietet die festgestellte Abhängigkeit der Veränderung der remanenten Sättigungsmagnetisierung bei Druck vom Wert der Koerzitivkraft neue Möglichkeiten bei der Bewertung der thermodynamischen Bildungsbedingungen.

Für die Kontrolle des Zustands eines ferromagnetischen Stoffes werden neben der mineralogischen Analyse auch die thermomagnetischen Separationsspektren angewendet [5]. Die Intervalle der höchsten Temperaturen, die nach den thermomagnetischen Spektren aufgestellt werden (Abb. 4b), geben Aufschluß über die Art des ferromagnetischen Stoffes, über seine Oxydationsprodukte, Phasenumwandlungen usw. So beträgt bei Diabas das Intervall der höchsten Temperaturen 560 - 580 °C, bei Granosyenit 550 - 570 °C und das größte Intervall ist bei Gneis mit 530 - 600 °C festzustellen.

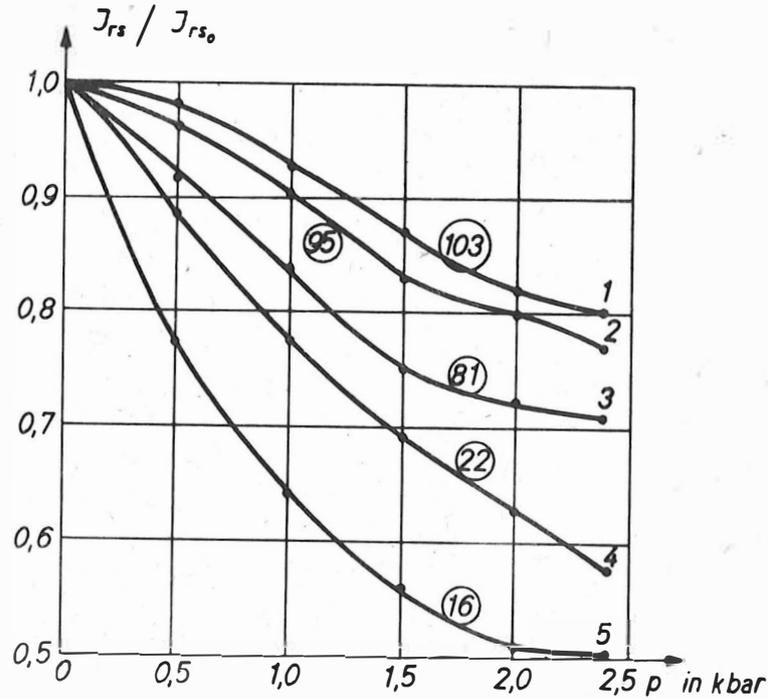


Abb. 4a

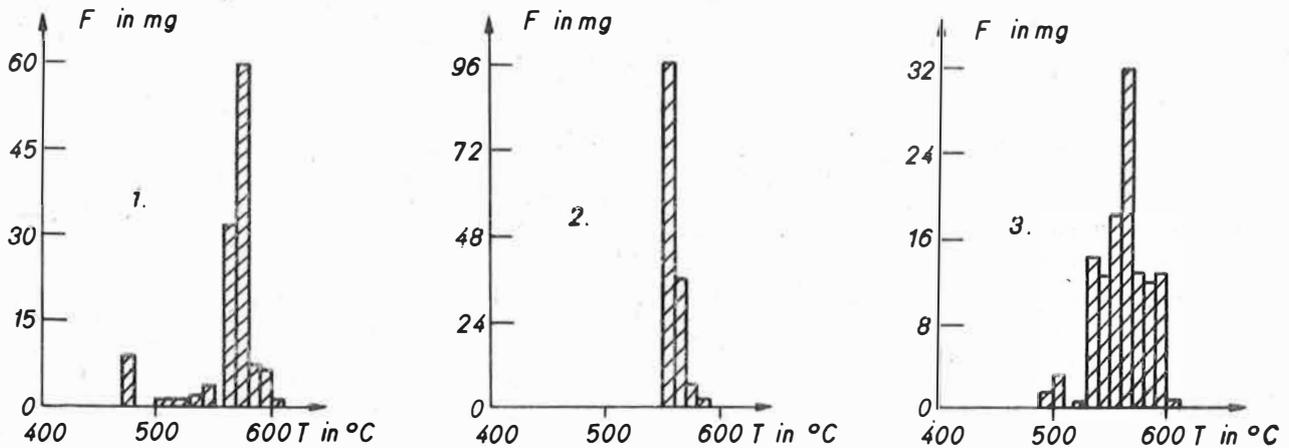


Abb. 4b

Abb. 4. Relative Veränderung der remanenten Sättigungsmagnetisierung von metamorphen und Eruptivgesteinen des Ukrainischen Schields und ihre thermomagnetischen Spektren.

a) 1 - Diabas; 2 - Granosyenit; 3 - Gneis; 4 - Diabasporphyrit; 5 - Granosyenit. In den Kreisen sind die Werte der Koerzitivkraft H_c in Oe angegeben;

b) thermomagnetische Spektren der Proben 1...3

Bemerkt werden muß, daß Magnetit das wichtigste ferromagnetische Mineral in den untersuchten Gesteinen ist. Die Breite des Intervalls der höchsten Temperaturen kennzeichnet den Oxydationsgrad des Magnetits.

Anders sieht es bei der Untersuchung der natürlichen remanenten Magnetisierung von Gesteinsarten aus. In diesem Fall hängt der zu beobachtende Gradient der Veränderung von I_n in vielem vom Charakter des physikalischen Prozesses ab, auf den die Entstehung der Magnetisierung des Gesteins zurückzuführen ist (Abb. 5), was von uns bereits erwähnt wurde.

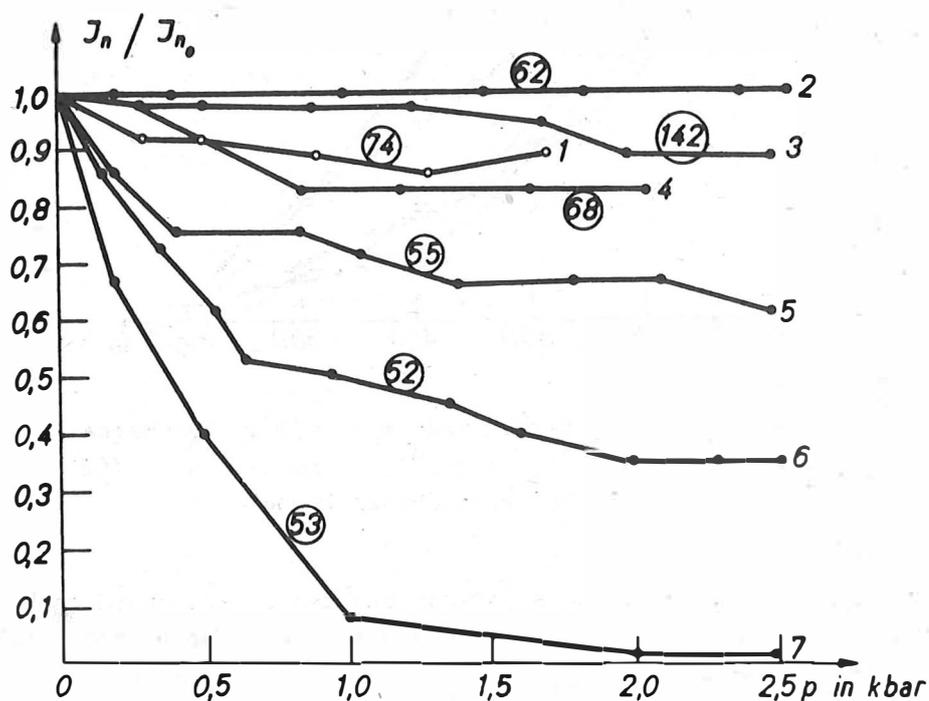


Abb. 5. Kurvenbild $I_n = f(P)$ der Proben einiger Gesteinsarten. In den Kreisen sind die Werte der Koerzitivkraft H_c in Oe angegeben. 1 und 3 - Diabas; 2 und 6 - Diabasporphyrit; 4 und 5 - Diabasporphyrittuff; 7 - Tuffsandstein

Die festgestellte indirekte Abhängigkeit des Grads der Veränderung der magnetischen Eigenschaften einer Mineralsubstanz vom Wert ihrer Koerzitivkraft machte eine noch genauere Messung erforderlich. Bei unseren experimentellen Untersuchungen wurde H_c durch die Messung der Feldstärke der Entmagnetisierungsfelder bei gleichzeitiger Angabe der Magnetisierung der Probe ermittelt. Dieses Verfahren wird in seiner Genauigkeit kaum durch den Fehler beeinflusst, der mit der Anordnung der Probe in ihrer Prüflage verbunden ist und hängt praktisch nicht von der Form und Größe der Probe ab. Für Proben, die in einem nichtmagnetischen Spezialofen eingesetzt werden,

können die Funktionen $I_{rs} = f(T^0)$ und $H_c = f(T^0)$ ermittelt werden. Das Beispiel einer solchen Abhängigkeit für Magnetit ist in Abb. 6 zu sehen.

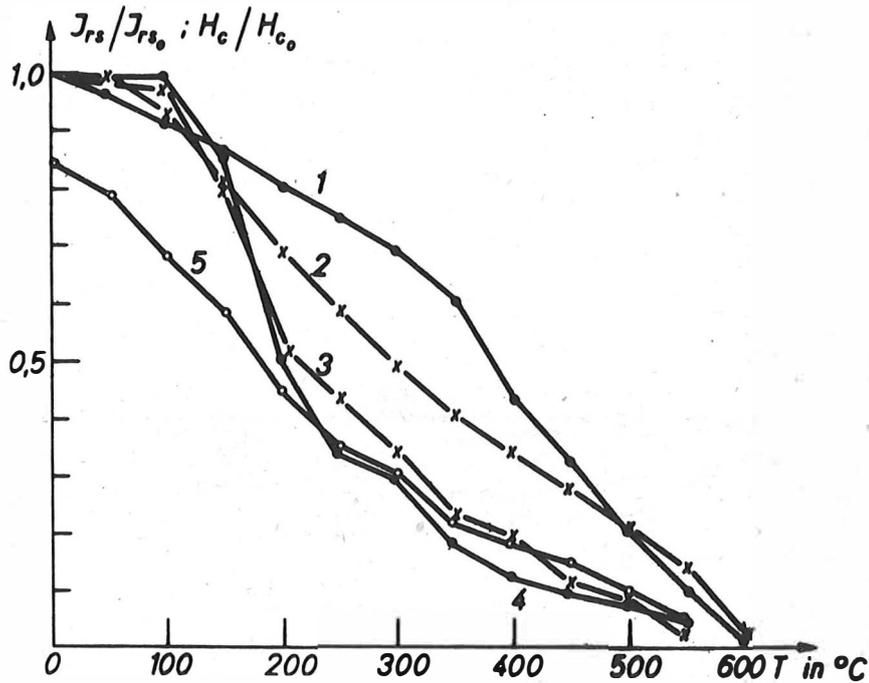


Abb. 6. Kurvenbild $I_{rs} = f(T^0)$ und $K_c = f(T^0)$ von Magnetitproben. 1 und 4 - $I_{rs} = f(T^0)$; 2 und 3 - $H_c = f(T^0)$; 5 - $I_{rs} = f(T^0)$ bei abgekühlter Probe

Somit kann mit der beschriebenen Apparatur und der Untersuchungsmethodik das erforderliche Informationsminimum über die Veränderung bestimmter magnetischer Kennwerte einer Mineralsubstanz bei hohen Drücken und Temperaturen ermittelt werden. Die weiteren Bemühungen sind offensichtlich auf die Vervollkommnung der Apparatur, die Erhöhung der Empfindlichkeit der Registriergeräte, die Vergrößerung des Druckbereichs, die Entwicklung effektiverer Heizelemente und die Ausarbeitung neuer Methodiken und Untersuchungsverfahren zu richten. Damit können zweifellos die experimentellen Möglichkeiten zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften einer Mineralsubstanz bei hohen thermodynamischen Parametern erweitert werden.

Literatur

- [1] LEBEDEV, T.S.;
ŠAPOVAL, V.I.;
KORČIN, V.A. Issledovanija vozdejstvija vysokich temperatur i davlenij na izmenenie skorosti v izveržennyh i metamorfičeskich gornych porodach. Geofiz. Sb. Akad. Nauk ukr. SSR 31 (1969), S. 75-93
- [2] LEBEDEV, T.S.;
ŠAVENKO, B.JA.;
ŠAPOVAL, V.I. Ostatočnoe vlijanie vysokich davlenij i temperatur na magnitnye svojstva granitoidov s različnoj prirodnoj estestvennoj ostatočnoj namagničennosti, in: Fizičeskie svojstva gornych porod pri vysokich termodinamičeskich parametrah. Naukova dumka, Kiev (1972), S. 82-84
- [3] LEBEDEV, T.S.;
ŠAVENKO, B.JA.;
ŠAPOVAL, V.I. Ustanovka dlja izučenija magnitnych svojstv gornych porod pri gidrostatičeskom davlenii do 2,5 kbar. Geofiz. Sb. Akad. Nauk ukr. SSR 46 (1972), S. 85-87
- [4] KINOSHITA, H. Studies on Piezo-Magnetization (III). PRM and relating phenomena. J. Geomagn. and Geoelectr. 20 (1968), S. 155-167
- [5] CYKORA, V.N.;
MICHAJLOVA, N.P.;
GLEVASSKAJA, A.M. Termomagnitnaja separacija magnitnych frakcij gornych porod c ispol'zovaniem separatora SIM-I, in: Materialy VIII. konferencii po postojannomu polju i paleomagnetizmu, Teil I, Naukova dumka, Kiev (1970), S. 202-208

