

550.382.3  
550.383.3  
550.386.32

## PALÄOMAGNETISMUS

VON

B. M. JANOVSKY

Universität von Leningrad<sup>1)</sup>

### Zusammenfassung

Im Artikel ist eine Übersicht über die jetzige Phase der paläomagnetischen Untersuchungen der Erde angegeben. Insbesondere ist die Umkehrbarkeit des erdmagnetischen Feldes nach der Magnetisierung in Sediment- und Eruptivgesteinen behandelt. Ausführliche Darstellungen erhalten die letzten Resultate des sowjetischen Geophysikers A. N. CHRAMOV von den Sedimentschichten von Westturkmenien. Auf Grund der Theorie, dass die Magnetachse der Erde mit der Rotationsachse höchstens um einen kleinen Winkel bildet, ist die Bahn des geographischen Nordpols auf der Erde während ungefähr 600—700 Millionen Jahre aufgezeichnet.

Die Erforschung der magnetischen Eigenschaften der Gesteine hat in den letzten zehn bis zwölf Jahren nicht nur den Geophysikern sondern auch den Geologen im Bereich des Studiums der Gestaltungsgeschichte unseres Planeten vom Proterozoikum bis in die Gegenwart ein verheißungsvolles Feld eröffnet. Es hat sich erwiesen, dass zahlreiche Gesteine Spuren des zur Zeit ihrer Entstehung vorhandenen Magnetfeldes tragen, ähnlich den tierischen und pflanzlichen Überresten, deren fossiles Vorkommen von ihrer einstigen Existenz augenscheinliches Zeugnis ablegen. Neben der Paläontologie, welche die Flora und Fauna vergangener Zeitalter erforscht, ist vor unseren Augen ein neuer Wissenschaftszweig,

---

<sup>1)</sup> Vortrag, gehalten am 13. Oktober 1959 in der Universität zu Helsinki.

der Paläomagnetismus im Entstehen, der sich mit den gleichen Epochen befasst und ebenfalls die Bestimmung des Alters verschiedener geologischer Gebilde zu seinen Zielen zählt. Während aber die Paläontologie lediglich die Möglichkeit bietet, die Bildungsfolge dieser oder jener Sedimentschicht zu enträtseln, besteht mit dem Paläomagnetismus die Aussicht, eine Bestimmung des absoluten Alters dieser Schichten zu erwirken. Dies ist der Grund, weshalb den Arbeiten auf dem Gebiet des Paläomagnetismus seitens der Geologen ebenso wie auch der Geophysiker grosses Interesse zuteil wird.

Es genügt darauf hinzuweisen, dass sich auf der elften Tagung der internationalen geodätischen und geophysikalischen Union im September 1957 in Toronto nicht weniger als zwanzig von den 100 Vorträgen im Symposium für Geomagnetismus mit Fragen des Paläomagnetismus befassten.

Der vorliegende Artikel hat das Ziel, das Wesen und die theoretischen sowie experimentellen Grundlagen des Paläomagnetismus zu beleuchten.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt wurde, besteht die Aufgabe des Paläomagnetismus darin, das Magnetfeld weit zurückliegender Epochen mittels der »Spuren« desselben in Gesteinen zu erforschen. Zum Verständnis des Wesens des Paläomagnetismus ist es deshalb notwendig zu wissen, worin diese Spuren bestehen und auf welche Art und Weise sie zustande gekommen sind.

Das Magnetfeld der Erde kann man sich in ersten Näherung als Feld eines Dauermagneten vorstellen, dessen Länge sehr gering im Verhältnis zum Erdhalbmesser ist. Das Zentrum dieses Magneten fällt mit dem Erdmittelpunkt zusammen und die Richtung der Magnetachse ist nahezu koinzident mit der Erdachse. (Gegenwärtig bildet die Magnetachse mit der Erdachse einen Winkel von  $11^\circ$ ).

Da die Gesetzmässigkeit des Verlaufs der magnetischen Feldlinien bekannt ist, so kann man, nachdem man die Richtung der Feldlinie in einem beliebigen Punkt der Erde hinsichtlich der Lotlinie und des Meridians am betreffenden Ort bestimmt hat, die Lage der Schnittpunkte der Magnetachse mit der Erdoberfläche bestimmen; diese Punkte nennen wir die Magnetpole der Erde.

Beobachtungen von mehr als vierhundertjähriger Dauer (1500—1950) haben gezeigt, dass sich die Stärke und Richtung des erdmagnetischen Feldes ununterbrochen ändert. So erweisen während dieser Zeitspanne in London ausgeführte Messungen der Elemente des Erdmagnetismus, dass der Endpunkt des Vektors der magnetischen Feldstärke auf einer

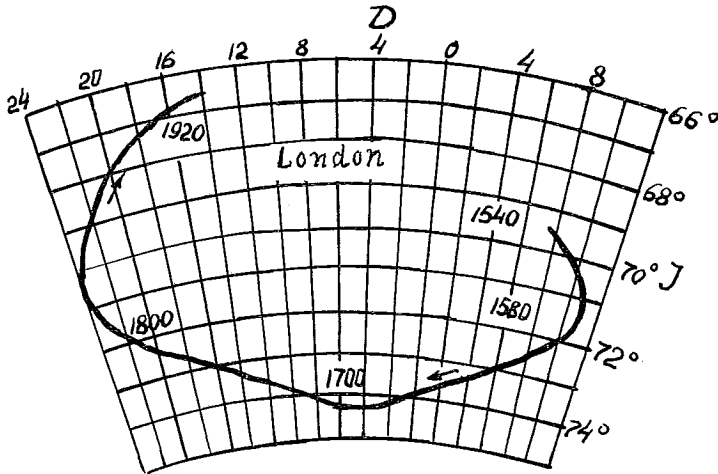


Abb. 1. Säkulare Variation des erdmagnetischen Feldes in London von 1540 bis 1940.

Kugel die in Abb. 1 gezeigte Kurve beschrieben hat. Wie aus eingehenderen Berechnungen hervorgeht, entsprechen diese Richtungsänderungen des besagten Vektors einer Bewegung des Magnetpols um die Erdachse, d.h. einer Präzession der Magnetachse um die Rotationsachse der Erde. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass sich die Kurve in reichlich 400 Jahren noch nicht geschlossen hat, woraus man schliessen kann, dass die Periode der Präzession länger als 400 Jahre ist. (Gegenwärtig setzt man diese Periode zu 800 bis 900 Jahren an. In dieser Weise hat man die variierende Natur des erdmagnetischen Feldes schon vor Jahrhunderten erkannt). Systematische Beobachtungen werden jedoch erst seit den dreissiger Jahren des vorigen Jahrhunderts also seit etwas über hundert Jahren betrieben. Nun stellt sich aber der Zeitraum von hundert Jahren als ungenügend zum Aufstellen einer Gesetzmässigkeit dieser Veränderungen heraus, auf Grund der man imstande wäre vorauszuberechnen, welcher Art das Magnetfeld in Zukunft sein wird, oder zu folgern, welche Gestalt es vor Millionen Jahren hatte. Diese Frage hat ohne Zweifel eine gewaltige Bedeutung für die Lösung einer ganzen Reihe von Problemen, die sich mit der Frage der geschichtlichen Entwicklung unseres Planeten befassen.

Der Ausweg aus dieser Lage wurde in der Erforschung der Restmagnetisierung von Gesteinen gefunden.

Unter den eruptiven und auch unter den Sedimentgesteinen finden sich nämlich sehr zahlreiche Modifikationen, die ferromagnetische Eigenschaften besitzen, d.h. sie werden unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes magnetisiert und behalten einen Teil ihres Magnetismus, den sogenannten Restmagnetismus, eine unbestimmte Zeit nach dem Verschwinden des Feldes oder nach einer Drehung des Gesteins um  $180^\circ$ . Wenn sich an irgendeinem Ort der Erdoberfläche ein Gestein mit ferromagnetischen Eigenschaften gebildet hat, wird dieses deshalb in der Richtung des zur Zeit seines Entstehens vorhandenen Feldes magnetisiert, und die Richtung dieser Magnetisierung kann sich Millionen Jahre hindurch erhalten ganz unabhängig davon, wie sich anschliessend das Magnetfeld der Erde ändern mag.

Wenn man einem solchen Gestein eine Probe entnimmt, deren räumliche Lage man zuvor durch geeignete Markierung festhält, und die Richtung der Magnetisierung in derselben bestimmt, kann man hierdurch die Feldstärke des Feldes berechnen, das zur Zeit der Bildung des Gesteins bestand.

Hiermit haben wir den Kern der Methode zur Bestimmung des Magnetfelds in weit zurückliegenden Zeiten und das Wesen des Paläomagnetismus erfasst. Als erster hat KÖNIGSBERGER auf die Möglichkeit diesartiger Untersuchungen hingewiesen; er kam bei seinem Studium des Restmagnetismus von Gesteinen zu dem Schluss, dass einige der Eruptivgesteine, die Magnetit und andere ferromagnetische Substanzen enthalten, zur Untersuchung der Richtung des zur Zeit ihrer ersten Abkühlung vorhandenen geomagnetischen Feldes und zur Schätzung des geomagnetischen Alters herangezogen werden können, vorausgesetzt dass in der Zwischenzeit keine tektonische Verschiebungen eingetreten sind.

KÖNIGSBERGERS Gedanke fand jedoch erst in den letztvergangenen zehn Jahren weitergehende wissenschaftliche Anwendung. (Einmal zuvor, in den 1930er Jahren, hat der französische Professor THELLIER diese Methode zur Bestimmung der Grösse und Richtung des magnetischen Feldes entlegener Zeiten benutzt, indem er den Restmagnetismus gebrannter Ziegel und Tongegenstände aus alten Gebäuden untersuchte.) Der Verwirklichung der Idee von KÖNIGSBERGER stellte sich vor allem die Schwierigkeit der Bestimmung des Alters solcher Eruptivgesteine entgegen, die Restmagnetismus aufwiesen. Dies erklärt auch weshalb THELLIER statt Eruptivgesteine gebrannte Ziegeln untersuchte, deren Backdatum bekannt war. Die Sachlage änderte sich grundlegend, nach-

dem die Existenz von Restmagnetismus in Sedimentgesteinen entdeckt wurde, derer Alter mit weitem grösserer Sicherheit bestimmbar ist.

Wir wollen uns nun kurz der Frage zuwenden, zu welchem Zeitpunkt die Magnetisierung der Gesteine stattgefunden hat und wieso sie ihren Magnetismus über Zeitspannen von hundert Millionen Jahren beibehalten konnten.

Die Hauptträger der ferromagnetischen Eigenschaften aller Gesteine sind die Minerale Magnetit ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Titanomagnetit ( $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ) und Pyrrhotin ( $\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$ ).

Je nach dem Gehalt an diesen Mineralen, wird das Gestein in verschieden hohem Grad ferromagnetisch. Vom reinen Magnetit abgesehen sind unter den Eruptivgesteinen die basischen und ultrabasischen Gesteinearten am stärksten magnetisch; zu diesen zählen u.a. Basalte, Gabbro, Peridotite und Pyroxenite.

Unter den Sedimentgesteinen sind Rotliegendes und einige Sandsteine solche, die Magnetitkörner enthalten.

Wie ausführliche Untersuchungen in zahlreichen Ländern gezeigt haben, stellt sich der stabile Restmagnetismus der Eruptivgesteine im Verlauf ihres Erkaltes vom Curiepunkt oder von einer noch höheren Temperatur bis auf die Normaltemperatur ein. Diese Art der Magnetisierung wird im Gegensatz zur induktiven Magnetisierung  $I_n$ , die sich beim Einbringen eines Ferromagneten bei normaler Temperatur in ein Magnetfeld ergibt, als thermoremanente Magnetisierung  $I_r$  bezeichnet. Für Gesteinsarten ist  $I_r$  bei weitem grösser als  $I_n$  und das Verhältnis  $\frac{I_r}{I_n}$  kann eine zweistellige Zahl erreichen. Dies liefert eine Erklärung für die Tatsache der Existenz starker magnetischer Anomalien, die bei rein induktiver Magnetisierung der Gesteine nicht möglich wären. Den Beweis dafür, dass der Restmagnetismus der Gesteine thermoremanenten Ursprungs ist, liefert eine Menge von Versuchen, die im Verlauf der letzten 25 Jahre durchgeführt worden sind. Erstmals wurde diese Erscheinung von FOLGER-HEITER 1897 entdeckt; während die ersten ausführlichen Versuche erst einige Jahrzehnte später (1932) von KÖNIGSBERGER vorgenommen wurden, der als erster den Gedanken über die Entstehung des Restmagnetismus in Gesteinen aussprach. Seit dieser Zeit hat KÖNIGSBERGER Ansicht vermöge der Arbeiten zahlreicher Forscher in verschiedensten Ländern allgemeine Anerkennung gefunden.

Die Sedimentgesteine werden bei ihrer Ablagerung magnetisiert, und zwar kommt der Magnetisierungsvorgang so zustande, dass sich die

kleinen, bereits thermoremanent magnetisierten ferromagnetischen Mineralkörnchen (Magnetit u.dgl.) der Richtung des erdmagnetischen Feldes orientieren, d.h. während sie beim Ablagerungsprozess fast frei in Wassersuspension schweben, stellt sich ihre Magnetachse unter dem Feldeinfluss in die Richtung des Feldes. Im Laboratorium ausgeführte Versuche betreffs der Ablagerung magnetischer Sedimentgesteine (JOHNSON und Mitarbeiter 1948 sowie NAGATA 1948) haben diesen Sachverhalt bestätigt.

Auf diese Weise friert gewissermassen das Magnetfeld der Eruptivgesteine zum Zeitpunkt ihrer Erkaltung und das der Sedimentgesteine bei ihrer Ablagerung durch ihre Magnetisierung im erdmagnetischen Feld gewissermassen fest, und sie behalten dieses Feld bis zum heutigen Tage bei, insofern sie nicht ihre Lage im Raum ändern.

Die Frage der Standhaftigkeit der thermoremanenten Magnetisierung und der Magnetisierung der Sedimentgesteine ist einer der Ecksteine des Paläomagnetismus, denn es hat wenig Sinn, Berechnungen über die Grösse und Richtung des Magnetfeldes entlegener Zeiten vorzunehmen und womöglich sogar Schlüsse zu ziehen, wenn man nicht Gewissheit hat, dass das Gestein seit seiner Bildung bis in die Gegenwart seine einstige Magnetisierung beibehalten hat.

Welche Ursachen können nun eine Änderung des Restmagnetismus hervorrufen? Als solche kann man folgende nennen: Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung und Struktur der Gesteine, die Änderungen in einigen ihrer Eigenschaften hervorrufen, tektonische Umwälzungen, die eine Änderung der räumlichen Orientation bewirken, wiederholte Erwärmungen der Gesteine, mechanische Beeinflussung desselben, z.B. der von neu hinzukommenden Schichten ausgeübte Druck, seismische Erschütterungen u.dgl., und nicht zumindest die Veränderungen der Grösse und Richtung des erdmagnetischen Feldes, die eine Ummagnetisierung des Gesteines hervorrufen können.

Aus diesem Grunde wird den Fragen der Standhaftigkeit der Gesteine in magnetischer Hinsicht seitens der Physiker und Geophysiker grosses Interesse entgegengebracht. Wenngleich in dieser Hinsicht noch kein endgültiges Ergebnis feststeht, hat man immerhin gewisse Kriterien aufstellen können, an Hand derer man mit hoher Zuversicht zu behaupten vermag, dass ein gewisses Gestein in der Tat unverändert die Richtung seiner Magnetisierung und einen grossen Teil ihres Betrages seit der Zeit seiner Entstehung unverändert beibehalten hat. Ein derartiges Kriterium wäre zum Beispiel das Verhältnis des Betrags des beobach-

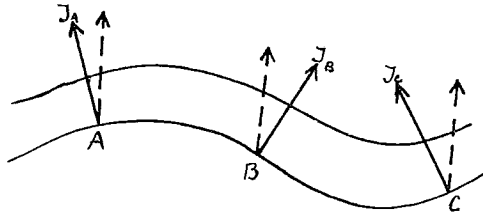


Abb. 2.

teten Restmagnetismus im Gestein zu demjenigen der thermoremanenten Magnetisierung, wie sie im Laboratorium beim Erkalten im erdmagnetischen Feld erhalten wird (NAGATA); wenn dieses Verhältnis innerhalb der Grenzen 0,5—1,5 liegt, kann man das Gestein ohne Zweifel als magnetisch stabil ansprechen.

Bei Sedimentgesteinen kann als Kriterium dieser Standhaftigkeit die Übereinstimmung der Magnetisierungsrichtungen  $I$  bei mehreren Proben, dienen, die man verschiedenen Stellen des Faltengebirges A, und B, C (Abb. 4) entnimmt und anschliessend in horizontale Lage bringt. Das Schema eines solchen Versuchs ist in der Abbildung (Abb. 2) gezeigt. Dieses Kriterium benutzte zum Beispiel der sowjetische Forscher A. N. CHRAMOW bei seinen Untersuchungen der magnetischen Eigenschaften der Sedimentgesteine in Westturkmenistan, über die wir noch weiter unten berichten werden.

CHRAMOWS Arbeiten zeigen, dass unter den Sedimentgesteinen, die einen Restmagnetismus besitzen, nur 5 % keine Veränderung erfahren hatten. Selbst diese Menge ist jedoch durchaus hinreichend, um eine Lösung der Fragen des Paläomagnetismus zu ermöglichen.

Hätten die Veränderungen des erdmagnetischen Feldes, die sich in der Änderung der Lage der Magnetachse in bezug auf die Erdachse zeigen, lediglich solchen Charakter, dass sie auf die Präzession der Magnetachse um die Erhachse unter einem kleinen Winkel zurückzuführen wären, so würden die Fragen des Paläomagnetismus nicht über den Rahmen des speziell mit dem Erdmagnetismus beschäftigten Zweiges der Geophysik hinausführen; und bis in die 1930er—1940er Jahre verhielt es sich tatsächlich so. Bis dahin herrschte unter den Geophysikern die feste Ansicht, dass die magnetische Achse der Erdkugel stets eine der gegenwärtigen sehr nahe gleiche Richtung besessen hat; insofern Änderungen stattfänden, hätten sie periodischen Charakter und würden

sich sehr geringfügig in der allgemeinen Lage des Magnetfeldes auswirken. Diese Überzeugung beruht darauf, dass angeblich alle bis dahin bekannte magnetische Anomalien, die sich aus dem Vorkommen magnetisierter Gesteine ergeben, positiven Charakter zeigten d.h. über dem Zentrum der Anomalie beobachtete man stets ein Feld von grösserem Betrag als das normale Erdfeld, und dass man glaubte, der Restmagnetismus dieser Gesteine habe immer eine dem heutigen Erdfeld ähnliche Richtung.

Indessen entdeckte in Jahre 1931 der sowjetische Geophysiker BERSUTSKI erstmalig in Sibirien im Gebiet der Flüsse Angara und Ilim eine Anomalie, die durch solche Gesteine zustande kam, die entgegen dem Erdfeld magnetisiert waren.

Diese Entdeckung rief sofort eine Hypothese über einen periodischen Wechsel des erdmagnetischen Feldes ins Leben (1933). Seitens der Geophysiker wurde sie allerdings entschieden abgelehnt und durch eine Reihe verschiedener Theorien zur Erklärung der negativen Magnetisierung ersetzt, wobei letztere die Erscheinung der spontanen Magnetisierung von Dauermagneten als Ausgangspunkt benutzten. Diese Erscheinung besteht darin, dass jeder Magnet in der Nähe seiner Oberfläche, parallel zur Magnetachse, ein Gegenfeld erzeugt. Das Feld strebt den Magneten zu entmagnetisieren und vermindert in der Tat den Betrag seines Magnetfeldes, den er bei Nichtvorhandensein des Feldes besitzen könnte. Die erste Hypothese dieser Art arbeitete L. B. BERSUTSKI aus, und zwar nahm er an, die negative Magnetisierung der Gesteine sei als Resultat der Einwirkung des entmagnetisierenden Feldes der Nachbargesteine zu betrachten, die in einer sehr viel zeitigeren Periode magnetisiert worden sind. Später, 1951, gab der Franzose NÖEL einige Mechanismen der umgekehrten Magnetisierung eines Gesteins an, wenn dieses ein zweiphasiges System ist, in dem die Phasen verschiedenartige magnetische Eigenschaften besitzen.

Während ungefähr zehn Jahren war die Anomalie von Angara-Ilim die einzige auf der Erde bekannte negative Anomalie und erregte daher nur rein theoretisches Interesse.

Die rege Entwicklung der geomagnetischen und insbesondere der magnetischen Forschung in den letzten zwanzig Jahren hat dazu geführt, dass die Existenz von negativen Anomalien in nahezu allen Teilen der Erde entdeckt wurde. Der Angara-Ilim-Anomalie ähnliche negative Anomalien wurden in Südafrika (Pilansberg), Nordengland, Deutschland und in Süd- und Nordamerika (im Staat Michigan) gefunden. Alle diese Anomalien stehen ausnahmelos mit Eruptivgesteinen im Zusam-



menhang. So besteht die Angara-Ilim-Anomalie aus Magnetiten und Trappen, die südamerikanische aus Dolerit-Diorit-Schollen, die deutsche aus Basalten u.s.f. Hierbei ist die Besonderheit zu beobachten, dass sie alle verschiedenen Alterstufen angehören. Einige von ihnen entstanden im Tertiär (die nordenglische Scholle), andere im Karbon (die nordamerikanische Scholle) und dritte im Permo-Trias (Angara-Ilim). Dies wurde lange als Hauptargument gegen die Hypothese der Umkehrbarkeit des Erdfeldes angeführt: ein und dasselbe Gestein eines gewissen Alters war zum grössten Teil im positiven Sinne, d.h. in der Richtung des heutigen Erdfeldes, magnetisiert und gab Anlass zu positiven Anomalien.

Trotz alledem wurde die Idee der Umkehrbarkeit des erdmagnetischen Feldes nicht aufgegeben, und zu Ende der 1940er und anfang 1950er Jahre zählte diese Theorie ebensoviele Anhänger wie Gegner. Die grössere Anzahl der Geophysiker war von der Beständigkeit des Erdfeldes überzeugt und bestrebt, die negative Magnetisierung durch innere Magnetisierungsmechanismen zu erklären.

In den Jahren 1952—1954 erschienen die Arbeiten des englischen Geophysikers J. HOSPERS, worin er den Restmagnetismus isländischer Lavagesteine der verschiedensten Altersstufen, vom Mittelpaläogenen bis in die Gegenwart untersuchte. Diese Untersuchung gab die Feststellung abwechselnder Zonen von umgekehrter Magnetisierung in den Lavaströmen, ungefähr parallel der Erdachse, sowie den Schluss, dass das Magnetfeld der Erde in fünfzig Millionen Jahren nicht weniger als viermal seine Richtung gewechselt hat. Das letzte Mal ist dies ungefähr zu Beginn des Quartärs eingetreten.

Als erste ausführliche Untersuchung des Restmagnetismus von Sedimentgesteinen kann man die Arbeit von J. CLEGG, M. ALMOND, P. STUBBS ansprechen, die 1954 veröffentlicht wurde. Die Autoren, welche die Sedimentgesteine verschiedener Altersstufen in England mit dem Devon beginnend untersuchten, fanden im Unterschied zu nicht nur Bildungen mit gerader und umgekehrter Magnetisierung, sondern auch unter verschiedenen Winkeln, im besonderen auch horizontal magnetisierte. Das gab Anlass die Standhaftigkeit einiger Bildungen anzuzweifeln und die Verschiedenheit in ihren magnetischen Orientierungen verschiedenerlei nach ihrer Ablagerung wirksam gewordenen Ursachen zuzuschreiben. Die Umkehrung des Magnetfeldes der Erde konnte man dadurch nicht erklären, und die Autoren, die eine Möglichkeit der Drehung des Erdfeldes um  $180^\circ$  nicht ablehnten, waren der Meinung, die

umgekehrte Magnetisierung könne auch lediglich von rein inneren Ursachen hervorgerufen sein.

Im September 1954 wurde in Rom die neunte Tagung der geodätisch-geophysikalischen Union veranstaltet, auf der die Fragen des Paläomagnetismus ausführlich besprochen wurden. Einen einheitlichen Standpunkt konnte man jedoch nicht erreichen, ausser dass man sich darüber einigte, dass die Grundursachen des Magnetfeldes der Erde und seiner Variationen im Lauf der Jahrhunderte im Erdkern konzentriert sind, der nach Angaben der Seismographen flüssig und elektrisch leitfähig ist und in dem auf Grund des Temperaturgradienten turbulente Strömungen existieren müssen.

Der englische Geophysiker S. RUNCORN, ein überzeugter Anhänger der Möglichkeit der Umkehrung des erdmagnetischen Feldes, legte auf dieser Tagung dar, dass sich unter Annahme des Existenz eines solchen Kernmodells theoretisch beweisen lässt, dass das Fundamentalmagnetfeld, welches ein Resultat der Induktionströme ist, sich möglicherweise um  $180^\circ$  drehen kann, sodass es stets parallel oder antiparallel zur Erdachse ist.

Mit dieser Arbeit ergab sich somit die Möglichkeit auch theoretisch die spontane Umkehrbarkeit der erdmagnetischen Achse zu erklären, in Ermangelung deren eine einmütige Anerkennung dieser Tatsache nicht erzielbar war.

In den drei Jahren nach Beendigung der Arbeit der besagten Tagung erschien eine grosse Anzahl von Arbeiten, die sich mit der Untersuchung des Restmagnetismus in Sedimentgesteinen in England, Amerika, Japan, Indien, Island, Österreich und in der UdSSR befassen.

Die Resultate aller dieser Arbeiten bestätigten vollkommen die schon früher beobachteten Fakta des Wechsels von gerader und umgekehrter Magnetisierung sowohl in Sediment- als auch in Eruptivgesteinen. Zur Zeit der Zusammenkunft der zehnten Tagung (September 1957) in Toronto äusserte sich niemand mehr gegen den Gedanken einer periodischen Umkehrbarkeit der Magnetpole der Erde; in dem Grad hatte diese Tatsache bereits Anerkennung erlangt. Immerhin blieb den umgekehrten Magnetisierungssinn der Gesteine durch den Einfluss innerer Ursachen in Ferromagneten selbst erklärende Theorie weiter bestehen; sie wurde nicht unmittelbar entwertet, aber sie besitzt nur noch spezielle Bedeutung zur Erklärung einiger besonderer Fälle, die in Eruptivgesteinen anzutreffen sind. Die Magnetisierung der Sedimentgesteine hängt aller Wahr-

scheinlichkeit nach mit der Umkehrbarkeit der Magnetachse der Erde zusammen.

Unter all den Arbeiten, die in den letzten drei Jahren erschienen sind, wollen wir uns bloss etwas ausführlicher mit der Arbeit des jungen sowjetischen Geophysikers A. N. CHRAMOW befassen.

CHRAMOW begann seine Arbeit schon im Jahre 1953. Er stellte sich die Frage, ob man wohl die Erscheinungen des Paläomagnetismus zu einer Korrelation der Sedimentschichten in Westturkmenien heranziehen kann. Es hat sich erwiesen, dass seine Resultate eine weit über die Grenzen dieser Aufgabe hinausgehende Tragweite besitzen; diese Arbeiten überragen sowohl hinsichtlich ihres Umfangs als auch ihrer Resultate die Mehrzahl der anderweitigen Untersuchungen gleichen Charakters. Es genügt zu erwähnen, dass CHRAMOW mehr als 3000 Proben in drei westturkmenischen Bezirken, nämlich im Gebiet des kleinen Balchasch, in Kürendag und auf der Halbinsel Tscheleken, die hunderte von Kilometern auseinanderliegen, gesammelt und untersucht hat.

Proben wurden bei den quartären Ablagerungen bis zu denen des unteren Pliozäns sowohl freiliegenden Schichten als auch mittels Bohrungen entnommen.

Als magnetisiert und in magnetischer Hinsicht standhaft erwiesen sich Tone, Aleuolite, roter, brauner, gelber Mergel, sowie ferner rote Sandsteine, die verschiedene Alterszonen vertreten.

Die Messergebnisse bezüglich des Restmagnetismus in den Proben führten zur Feststellung der folgenden Umstände:

1. Die Gesamtheit der Schnitte der quartären Ablagerungen, deren Entstehung in die neueste Periode von einer Million Jahren fällt, enthält keine einzige Probe, die entgegen dem heutigen Erdfeld magnetisiert wäre. Hieraus kann man folgern, dass im Verlauf des Quartärs das Magnetfeld seine Richtung nicht geändert hat; wie ferner die Messungen der Magnetisierungsrichtungen dieser Proben zeigen, hat die Magnetachse eine Ablenkung um einen kleinen Winkel von der Rotationsachse der Erde aufgewiesen.

Dieses Resultat steht vollkommen im Einklang mit dem Resultat aus den Beobachtungen, die in den im gleichen Jahr in Japan von NAGATA an Lavaströmen des Quartärs vorgenommenen Untersuchungen gemacht wurden.

2. In weit älteren Ablagerungen des Pliozäns, die eine Vergangenheit von ein bis zwanzig Millionen Jahren umspannen, ist etwa die Hälfte aller magnetisierten Schichten entgegen dem Erdfeld magnetisiert, und

zwar schliessen sich die gleichsinnig bzw. gegensinnig magnetisierten Gebilde zu Zonen annähernd gleicher Stärke zusammen. Diese Zonen weisen stratigraphisch eine besondere Lage im Bereich des gesamten Gebiets auf.

Insgesamt lassen sich bei der Sohle des mittleren Pliozäns beginnend bis zu den quartären Ablagerungen alternierend fünf solche Zonen mit direkter und fünf mit gegensinniger Magnetisierung nachweisen. Wenn wir die Zeitspanne vom mittleren Pliozän bis zum Quartär mit 6—7 Millionen Jahren einschätzen, vertreten die Perioden gleich- und gegensinniger Lage der Magnetachse Intervalle von je 0,6—0,7 Millionen Jahren.

Die Übergangsepochen haben laut den Messungen eine Dauer von ungefähr 10 000 Jahren.

Ebensolche Resultate wurden in Arbeiten amerikanischer sowie auch europäischer Forscher (S. RUNCORN, A. ROCHE, C. CAMPBELL u.a.) erhalten. In Fortsetzung seiner Arbeiten untersuchte A. N. CHERAMOW mit anderen sowjetischen Forschern in den letzten Jahren die Sedimentgesteine des frühen Paläogens von 20—70 Millionen Jahren vor unserer Zeit, der unteren Kreide (ungefähr 100 Millionen Jahre), des Perms (un-

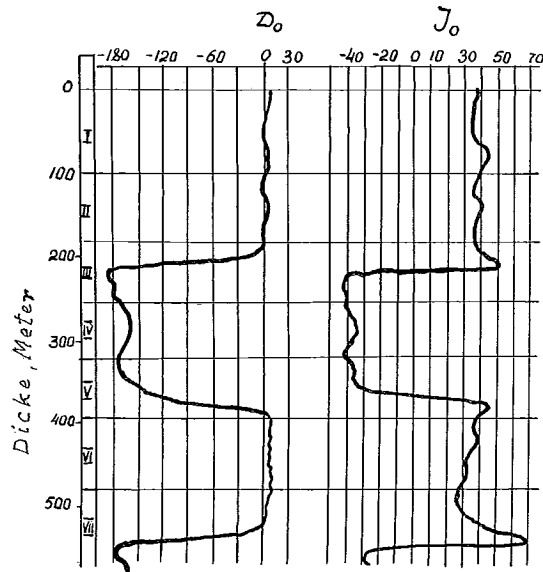


Abb. 3. Verlauf der Deklination und Inklination in der roten Serie von Tšheleken.

gefähr 200 Millionen Jahre) und des Silur (ungefähr 300 Millionen Jahre) in den Gebieten des Westurals sowie im Leningrader Gebiet. Diese Untersuchungen zeigten ebensolche periodische Wechsel der gleich- und gegensinnigen Magnetisierung der Sedimentgesteine auf. Jedoch wiegt hier die Bestanddauer der einen oder der anderen Richtung stark über. Aller Wahrscheinlichkeit nach findet der Wechsel von der einen zur anderen Richtung nicht öfter als alle 5–10 Millionen Jahre statt. All dies stimmt ebensogut mit den Ergebnissen der ausländischen Forscher überein.

Abb. 3 zeigt den Zusammenhang zwischen den Richtungen des Restmagnetismus der Gesteine in der horizontalen bzw. vertikalen Ebene, wie sie CHRAMOW als Resultat seiner Untersuchungen gefunden hat. Hierbei ist das Alter der Gesteine durch die Tiefe ihrer Lage kennzeichnet.

Wenn man annimmt, dass sich die Gesteine nur in der Richtung des Magnetfeldes magnetisiert haben, so kann man in Abb. 3 die zeitliche Änderung der Feldrichtung verfolgen (links Deklination, rechts Inklination).

Die Kurve zeigt deutlich den periodischen Wechsel der positiven und negativen Inklination (von  $+40^\circ$  bis  $-40^\circ$ ) und die Umschläge der Deklination von  $180^\circ$ .

Das Gesamtbild entspricht dem, dass der nördliche Magnetpol, der sich in der Nähe des geographischen Pols befindet, zu einem gewissen Zeitpunkt längs eines Meridians, der weit westlich vom Beobachtungspunkt in Turkmenistan liegt, nach Süden zu wandern beginnt, den geographischen Südpol erreicht und danach auf dem gleichen Weg zurückkehrt.

Wenn ein solches Ereignis in der Geschichte der Erde eintritt, muss entsprechend überall auf der Erde ein Wechsel der gleich- und gegensinnig magnetisierten Gesteine in der Eruptiv- und Sedimentschichten anzutreffen sein. Dies können die Ergebnisse der Untersuchungen von CHRAMOW selbst bestätigen, der paläomagnetische Untersuchungen in drei, 100–300 km voneinander entfernten Gebieten in Westturkmenistan durchführte. Abb. 4 gibt eine Gegenüberstellung der gleich- und gegensinnig magnetisierten Gesteine der verschiedenen Gebiete, ihrem Alter nach geordnet. Jeder Pfeiler entspricht einem der Schnitze, deren Proben zur Untersuchung entnommen wurden. Die Zeichnung zeigt mit grosser Deutlichkeit an, dass zumindest im westturkmenistanischen Gebiet die Magnetisierung simultan vor sich gegangen ist. Die Gegenüberstellung weit voneinander entfernter Gebiete scheidert vorläufig

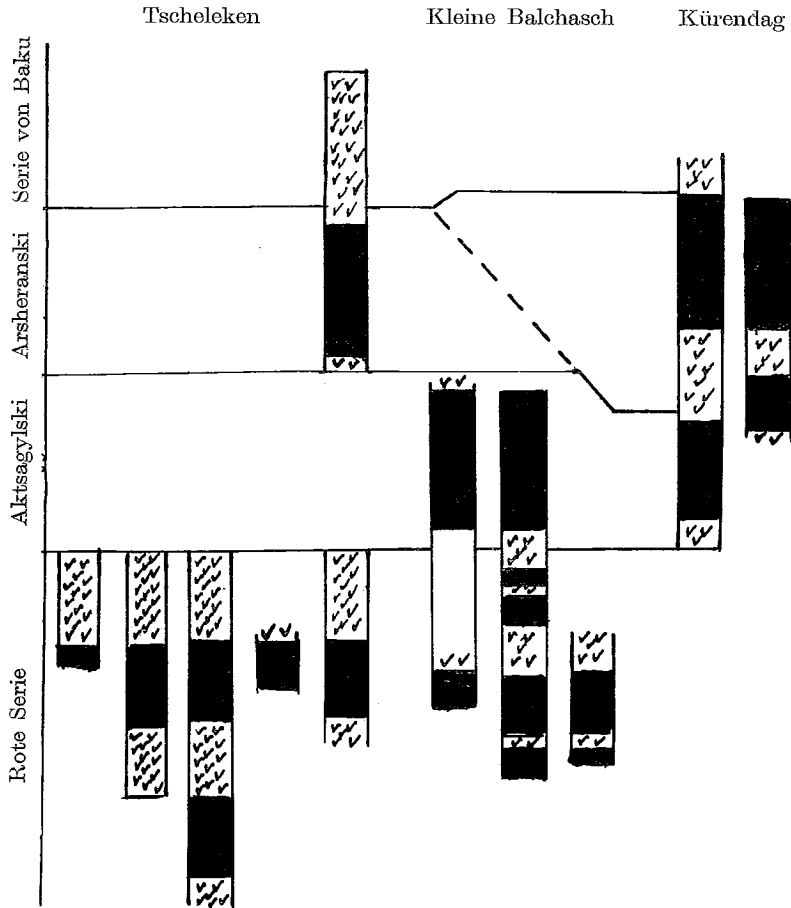


Abb. 4. Magnetische Zonen der gleich- und gegensinnig magnetisierten Gesteine in Westturkmenien.

noch an den Schwierigkeiten, die sich aus den Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Gleichhaltlichkeit der Schichten ergeben. Immerhin haben diesartige Untersuchungen, z.B. diejenigen in Island an Lavagesteinen, gezeigt, dass in der gleichen Epoche des oberen Pliozäns ein Wechsel der Magnetisierung auftritt, welches guten Grund zur Annahme liefert, dass die Magnetisierung der Gesteine in der Tat im oben besprochenen Sinne gleichzeitig ist und folglich auch die Drehung der erdmagnetischen Achse der Erde um  $180^\circ$  der Wirklichkeit entspricht.

Eine andere nicht minder paradoxe Folgerung aus den paläomagnetischen Untersuchungen der letzten Jahre ist die Verschiebung der geographischen Pole im Laufe der Zeit, oder mit anderen Worten die Verschiebung der Rotationsachse der Erde in bezug auf die Erdkugel. Zu Beginn des Artikels wurde gesagt, dass gegenwärtig die Magnetachse der Erde mit ihrer Rotationsachse ungefähr übereinstimmt. Dieser Umstand ist kein Zufall, sondern eine Folge der Natur des Erdmagnetismus. Die heutige Theorie der Entstehung des Magnetfeldes der Erde, die mit grosser Wahrscheinlichkeit den Tatsachen entspricht, kommt zum Schluss, dass die Magnetachse der Erde mit der Rotationsachse zusammenfallen muss oder höchstens um einen kleinen Winkel davon abweichen kann.

Wenn wir also die Lage der Magnetpole bestimmen, finden wir damit gleichzeitig auch die Lage der Rotationsachse in der im Frage stehenden Epoche.

Solche Bestimmungen, die in den letzten drei bis vier Jahren in verschiedenen Ländern, und von verschiedenen, unter anderen auch sowjetischen Forschern durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Rotationsachse der Erde während der Zeit, die vom Beginn der Formierung der Erdkruste (Proterozoikum) bis zu unseren Tagen, verstrichen ist, d.h. in ungefähr 600—700 Millionen Jahren, stetig ihre Lage geändert hat, wobei sie bisweilen einen Winkel bis zu  $90^\circ$  mit ihrer heutigen Lage bildete.

In Abb. 5 ist schematisch die Bewegung des Nordpols in der erwähnten Zeit, nach Angaben verschiedener Autoren, wiedergegeben.

Die Abbildung zeigt, dass der Nordpol, in der Epoche des niederen Proterozoikum ( $Pcm_1$ ) (vor 700 Millionen Jahren) im Zentralgebiet Nordamerikas gelegen, nach Westen zu wandern begann, sich im Laufe des oberen Proterozoikum ( $Pcm_2$ ), des Kambrium (Cm), d.h. während ungefähr 200—300 Millionen Jahren, den gesamten Stillen Ozean südlich der Hawaiiinseln durchquerte, sich im Silur (DSD) in der Nähe der japanischen Küste befand und danach nach Norden abbog. Im oberen Paleozoikum (T) befand sich der Nordpol im fernen Osten der UdSSR, zeigte sich im Jura (IP) in der Nähe der Ufer des nördlichen Eismeres, innerhalb dessen Grenzen er auch in der Folgezeit verblieben ist.

Es ist noch zu erwähnen, dass die rasche Wendung der Magnetachse um  $180^\circ$ , die in jeder Epoche in kurzen Zeitabständen stattgefunden hat, nicht von einer Umkehr der Rotationsachse begleitet war. Daraus erklärt sich auch, dass die Drehung der Magnetachse relativ schnell (in 10 000—

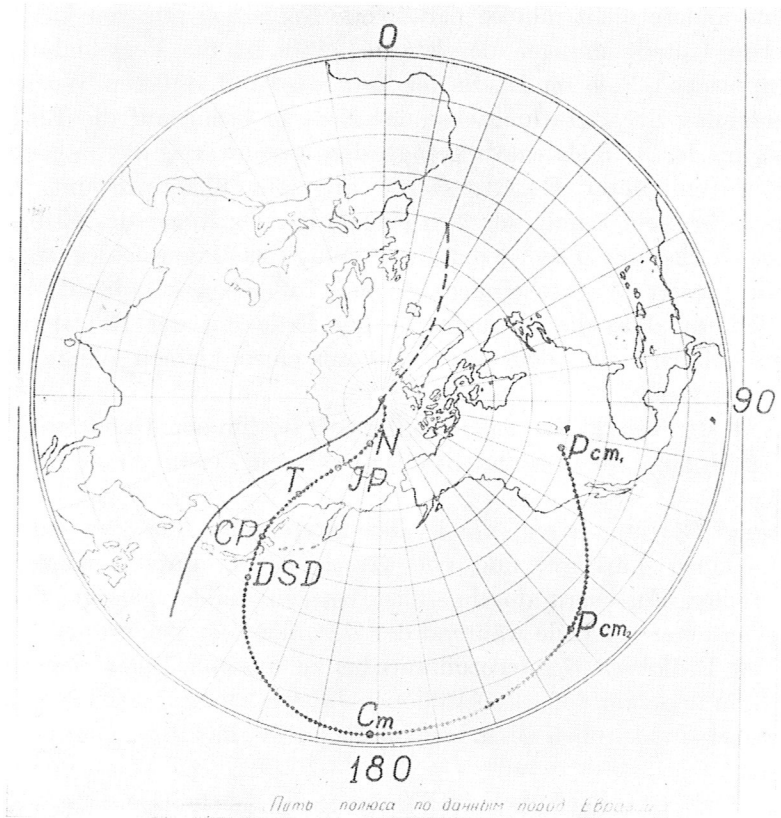


Abb. 5. Polwanderung nach den Untersuchung über die Eur-Asiatischen Ablagerungen.

15 000 Jahren) vor sich geht, indem sie sich so schnell wie möglich parallel zur Rotationsachse einzurichten strebt, ohne Rücksicht darauf ob der magnetische Nordpol mit dem geographischen Nordpol zusammenfällt oder umgekehrt.

Ausserordentlich interessant erwies sich der Umstand der Übereinstimmung dieser Resultate mit den Ergebnissen paläoklimatischer Untersuchungen, die ebenfalls zu dem Schluss führten, dass die geographischen Pole in früheren Zeiten ungefähr die in Abb. 5 eingetragene Lage hatten.

Schliesslich führten die paläomagnetischen Untersuchungen zu der Notwendigkeit, die längst in Vergessenheit geratene Hypothese der



Kontinentalverschiebung (WEGENER) neu aufzunehmen. Durch Zusammenstellen der Resultate von Bestimmungen der Lage der Magnetpole in weit zurückliegenden Epochen nach Angaben europäischer und amerikanischer Untersuchungen konnte man einen systematischen Parallelismus derselben beobachten. Die Bahnen der Polbewegungen erwiesen sich aber um einen gewissen Abstand gegeneinander verschoben. Eine solche Abweichung konnte man erklären wenn man annahm, dass sich das amerikanische und europäische Kontinent stätig zueinander verschieben.

Dies sind die Resultate, die aus den paläomagnetischen Untersuchungen hervorgehen. Sie sind höchst paradoxal und vertragen sich schlecht mit den praktischen Vorstellungen über die Struktur unseres Planeten. Deshalb sind sie vorläufig noch diskutabel, und die Hauptwiderung gegen sie ist die Frage des Mechanismus der Magnetisierung der Gesteine sowie diejenige der Standhaftigkeit ihres Restmagnetismus.

Man soll jedoch bedenken, dass all diese Resultate erst in der letzten fünf bis sechs Jahren erhalten worden sind und daher natürlicherweise unter den Nachteilen mitunter voreiligen Schlüssen und der Unabgeschlossenheit der Untersuchungen leiden. Trotz alledem zwingt uns die Übereinstimmung der Ermittlungen von verschiedenen Autoren und in den verschiedensten Teilen der Erdkugel ihnen grosses Vertrauen entgegenzubringen. Wir können hoffen, dass das Interesse den geomagnetischen Untersuchungen und ihrer stürmischen Entwicklung gegenüber, das heutzutages in allen Geophysikern wach wird, uns in allernächster Zeit die Möglichkeit in die Hand geben wird allgemeine Gesetze der Veränderungen des erdmagnetischen Feldes aufzustellen und ihre Ursachen aufzuklären, die mit der Struktur der Erdkugel verknüpft sind.

#### L I T E R A T U R

A. H. Храмов, 1958: Палеомагнитная корреляция осадочных толщ. Leningrad.