

## Zur Geochemie der Thermalwässer in den Berggebieten Südsibiriens

Von I. S. LOMONOSSOW und E. V. PINNEKER (Irkutsk, UdSSR)

(2 Tabellen im Anhang)

### Einleitung

Unter dem Süden Sibiriens versteht man in der vorliegenden Abhandlung die sich vom Ob bis zu den Quellflüssen des Amur erstreckenden Gebirgsräume. Dieses weitläufige Territorium umfaßt den Altai, das Sajano-Tuwinische Hochland, das Baikalseegebiet und das Gebirgssystem des östlichen Transbaikaliens. In den Grenzen der Sowjetunion beträgt seine Fläche 1 Mill km<sup>2</sup> (Tafel I). Der Süden Sibiriens zeichnet sich durch bedeutende Mineralwasserschätze von sehr verschiedenartigem Mineralgehalt und den verschiedensten Eigenschaften aus (z. B. thermale, salzige, kohlendioxid-, radon- und eisenhaltige Wässer). An vielen Mineralquellen entstanden Kurorte. Das hier zu betrachtende Territorium erinnert bezüglich des Reichtums an Mineralquellen sehr an die hydrominerales Zone der Alpen und Karpaten. Besonders weit sind hier, wie auch in Mitteleuropa, die Thermalwässer verbreitet, deren geochemischer Charakteristik die vorliegende Abhandlung gewidmet ist.

Die erste Kenntnis von den Thermalwässern im südlichen Teil Sibiriens geht auf die Gelehrten des XVIII. Jahrhunderts mit den klassischen Reisen von S. G. GMELIN, I. G. GEORGI und P. S. PALLAS zurück. Im XIX. Jahrhundert entstanden an den Thermalquellen die ersten Kurorte. Um die Jahrhundertwende schon zeigten einzelne Forscher (I. A. BAGASCHEW, W. A. OBRUTSCHEW, A. W. LWOW, I. A. DERWIS, M. G. KURLOW u. a.) ein großes Interesse für diese Thermalquellen. W. A. ALBAGATSCHIEWA, G. A. ANKUDINOWA, A. G. FRANK-KAMENEZKI, N. W. JASNITSKAJA, W. W. KRASSINZEWA, M. I. KUTSCHIN, S. W. OBRUTSCHEW, L. M. ORLOWA, E. A. PRESNJAKOW, W. G. TRATSCHUK, N. I. TOLSTICHIN, W. I. WALEDINSKI, M. M. WASSILJEWSKI u. v. a. haben in den dreißiger und fünfziger Jahren des laufenden Jahrhunderts die Gesetzmäßigkeiten der Verteilung und die Zusammensetzung und Bildungsbedingungen der Thermalwässer untersucht. In den letzten Jahren befaßten sich mit der Thermenforschung L. N. BARABANOW, I. M. BORISENKO, N. M. ELMANOWA, G. I. KLIMOW, B. I. PISSARSKI, W. G. SIDOROW und G. M. SPEISER. W. G. TRATSCHUK und N. I. TOLSTICHIN, unter deren Redaktion das Buch „Mineralwässer vom Süden Ostsibiriens“ (1961) veröffentlicht wurde, haben wesentlich zur weiteren Erkundung beigetragen.

Aber die Geochemie der Thermalwässer blieb bis in die letzte Zeit hinein nicht gründlich erforscht. Die Autoren der vorliegenden Abhandlung befaßten sich in den letzten fünf Jahren mit dieser Frage. Im Verlauf der in den schwer erreichbaren Gebieten durchgeführten Expeditionsuntersuchungen wurden auch einige bisher unbekannte Thermalquellen festgestellt und ein umfangreiches Tatsachenmaterial zur Geochemie der Thermen gesammelt (I. S. LOMONOSSOW, 1968; I. S. LOMONOSSOW & S. V. LYSAK, 1967; E. V. PINNEKER, 1968; E. V. PINNEKER et al. 1968).

## **Geologisch-hydrogeologische Bedingungen und Gesetzmäßigkeiten der Verbreitung der Thermalwässer**

Der Süden Sibiriens stellt ein stark gegliedertes, stellenweise schwer erreichbares und wenig besiedeltes Bergland mit hohen Gebirgen dar, die von großen breiten Flußtälern (Katun, Bija, Jenissei, Oka, Selenga, Witim, Olekma, Schilka und Argun) durchzogen werden. An der Stelle, wo Schilka und Argun zusammenfließen, nimmt der Amur seinen Anfang. Im Altai und an der Grenze von Ost-Sajan und Chamar-Daban befinden sich die höchsten Gipfel des Berglandes im südlichen Teil Sibiriens, das sind Belucha (4506 m) und Munku-Sardyk (3491 m). Den tiefstgelegenen Bereich nimmt der Grund der wasserreichen Senke des Baikalsees ein, der gegenüber der Olchon-Insel bis 1166 m unter den Meeresspiegel reicht.

Die hydrogeologischen Bedingungen Südsibiriens sind gekennzeichnet durch die ziemlich komplizierte, heterogene geologische Struktur dieses Territoriums, wo es neben den aus uralten metamorphen und eruptiven Gesteinen zusammengesetzten Faltegebirgen mehrere tiefe Senken gibt, die durch känozoische (d. h. Senken nach dem baikalischen Typ), durch mesozoische (d. h. Senken nach dem transbaikalischen Typ) und im westlichsten Teil durch paläozoische (das sind tuwinische und ähnliche Senken) Ablagerungen ausgefüllt sind. Die intensiven neotektonischen Bewegungen und die erhöhte Erdbebentätigkeit üben einen großen Einfluß auf die hydrogeologischen Gegebenheiten aus. Die Gebirge und zwischengeschalteten (meist interalpinen) Senken sind hydrogeologische Strukturen mannigfacher Art. Die ersteren stellen hydrogeologische Massive dar und lassen sich durch Kluftwässer in den magmatischen und metamorphen Gesteinen charakterisieren, letztere sind artesischen Becken mit den Horizonten der Schicht- und Kluftwässer in den sedimentären Ablagerungen. Alle wasserführenden Gesteine bilden somit zwei strukturelle Stockwerke — Sedimentärüberdeckung und kristallines Fundament —, die sich nach der Wasserführung deutlich voneinander unterscheiden.

In den Berggebieten Südsibiriens sind die Kluftwässer der eruptiven und metamorphen Gesteine des Archäozoikums und Proterozoikums überall weit verbreitet. Viel seltener kommen Karst- und Schichtwässer

Tafel I: Karte der Thermalwässer in den Berggebieten Südsibiriens

Hydromineralische Gebiete und Bereiche: 1 — Altai-West-sajaner Gebiet der Stickstoffthermen, 2 — Ostsajaner Gebiet der thermalen und kalten Kohlensäurewässer, 3 — Baikalseegebiet der Stickstoff- und Methanthermen, 4 — Daurer Gebiet der kalten Kohlensäurewässer mit lokaler Verbreitung von Stickstoffthermen (einschließend: 5 — Ingodino-Tschikoisker Bereich der Stickstoffthermen, 6 — Gasimursker Bereich der Stickstoff- und Kohlendioxyd-Stickstoffthermen), 7 — Bereiche festgestellter oder vermutlicher Verbreitung von Methanthermen (Senken vom Baikaltyp).

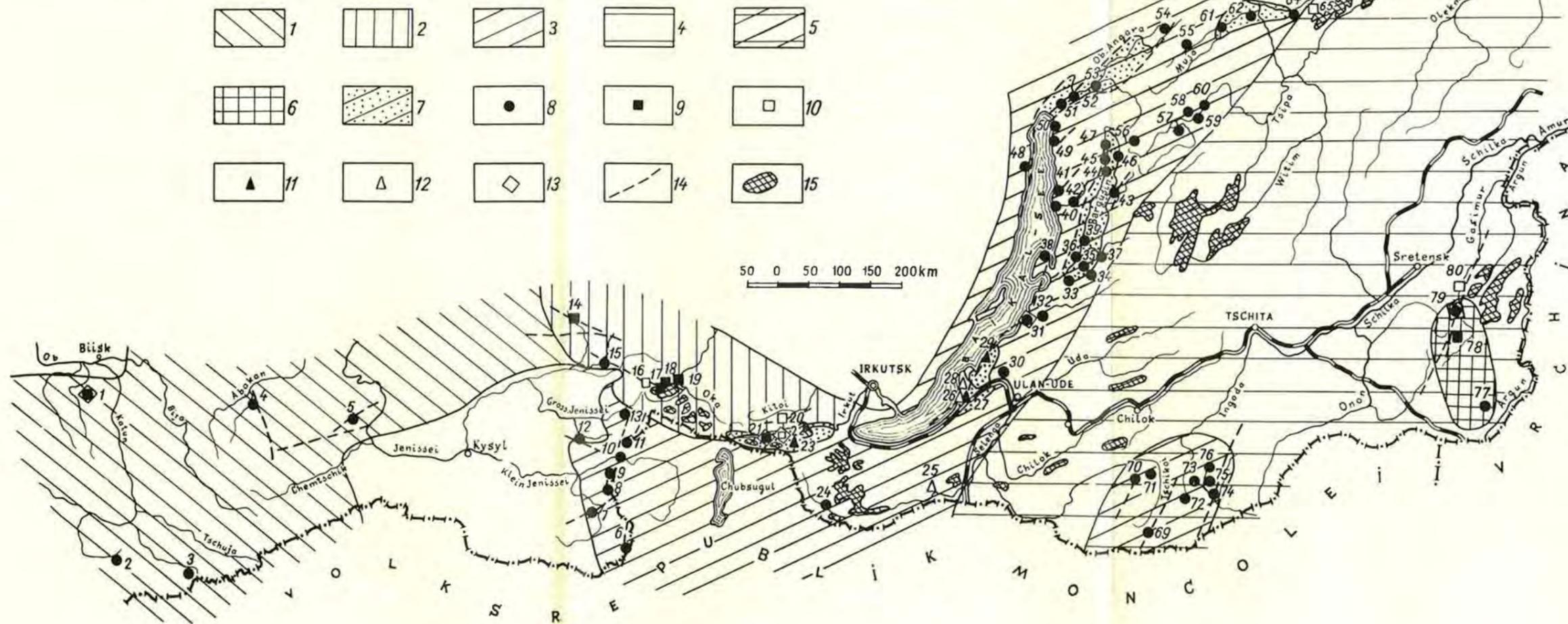
Grundarten der Thermen: 8 — Stickstoffwässer, 9 — Kohlendioxyd-Stickstoff- und Stickstoff-Kohlendioxyd-Wässer, 10 — Kohlendioxydwässer, 11 — Methanwässer, 12 — Stickstoff-Methan-Wässer.

Andere Bezeichnungen: 13 — bestehende Kurorte, 14 — Linien und Zonen tektonischer Störungen, längs deren Thermalwässer auftreten, 15 — Känozoische Basalte.

Benennungen von Mineralquellen: 1 — Belokuricha, 2 — Rachmanowski, 3 — Dshumala, 4 — Abakan, 5 — Tschulaksy, 6 — Tarys, 7 —

Tere-Chol, 8 — Businski, 9 — Dshiglagin, 10 — Usch-Beldir, 11 — Tschawatsch, 12 — Maimalysch, 13 — Ulug-Adyr-Oi, 14 — Kishi-Chem, 15 — Bedij, 16 — Tschoigan, 17 — Dargal, 18 — Choito-Gol, 19 — Cholun-Ugun, 20 — Schumak, 21 — Nilowa Pustyn, 22 — Arschan-Tunkinski, 23 — Bohrung Tunka - 1, 24 — Engorboi, 25 — Bohrung Stepnaja - 2, 26 — Bohrung Istok - 1, 27 — Bohrung Istok - 3, 28 — Bohrung Tworogowo - 1, 29 — Bohrung Suchaja - 1, 30 — Bohrung Pitalewo - 52, 31 — Gorjatschinsk, 32 — Solotoi Kljutsch, 33 — Gusicha, 34 — Uro, 35 — Alga, 36 — Tolstichinski, 37 — Ina, 38 — Smüny, 39 — Bystrinski, 40 — Dawscha, 41 — Jasowka, 42 — Bolscherechtschenski, 43 — Garga, 44 — Alla, 45 — Kutschechir, 46 — Sejuiski, 47 — Umchei, 48 — Kotelnikowski, 49 — Chakusy, 50 — Frolicha, 51 — Korikei, 52 — Dselinda, 53 — Irkana, 54 — Turikan, 55 — Mujakan, 56 — Ammunda, 57 — Baunt, 58 — Busani, 59 — Schurinda, 60 — Mogoi, 61 — Muja, 62 — Tolmatschewo, 63 — Tschelolek, 64 — Purelag, 65 — Syni, 66 — Traver-tinowy, 67 — Werchnetscharki, 68 — Olekma, 69 — Semiosjerski, 70 — Kunalei, 71 — Jasytai, 72 — Werchniingodinski, 73 — Kyrinski, 74 — Talat-schinski, 75 — Bylyra, 76 — Ulura, 77 — Abagatui, 78 — Nikoliewski, 79 — Jamkun, 80 — Aktagutschinski.

Tafel I



in den Sedimentgesteinen des Paläozoikums vor. Metamorphe Gesteine enthalten hauptsächlich drucklose und druckschwache Wässer in der oberen Zone von stark klüftigen Gesteinen, wobei die Wasserergiebigkeit der Terrigengesteine des Archäikums-Proterozoikums sehr gering ist (die Schüttung der Quellen schwankt erheblich von Hundertstel bis 2 l/s), während die Karbonatgesteine durch ziemlich hohe Wasserergiebigkeit charakterisiert werden (die Schüttung einzelner Quellen erreicht 10 bis 300 l/s). Eine besonders unterschiedliche Wasserergiebigkeit weisen eruptive Gesteine auf; eine größere Ergiebigkeit ist nur den Bereichen der tektonischen Störungen eigen, mit denen nicht selten azendente Gangwässer verbunden sind. In der Schichtenfolge der lockeren Sedimente der interalpiner Senken ist ein Wechsel wasserführender und wasserstauer Gesteine festgestellt worden. Nahe der Erdoberfläche kommen gewöhnlich drucklose Wässer vor, tiefer lagern unterirdische Druckwässer. Die Wasserergiebigkeit der verschiedenen Schichten bewegt sich in einem beträchtlich großen Bereich, die Ergiebigkeit einzelner Bohrungen erreicht nicht selten 1 bis 10 l/s.

Die Ewige Gefrornis beeinflusst in starkem Maße die Bildungsverhältnisse, das Wasserregime und die Bewegung unterirdischer Wässer des behandelten Territoriums. Die Eisgesteine sind fast überall verbreitet und erreichen in einzelnen Fällen auf den Wasserscheiden eine Mächtigkeit von 100 m (Udokan-Gebirge), sie fehlen nur in den breiten, großen Flußtäälern oder unter den Seegründen. In der Nähe der Thermalquellen, die „Lücken“ in der „Decke“ der Ewigen Gefrornis darstellen, übersteigt die Mächtigkeit der Eisgesteine nur selten 30 bis 60 m.

Abhängig von der territorialen Zugehörigkeit, den Besonderheiten des geologischen Baues, der Intensität neotektonischer Tätigkeit und des jungen Vulkanismus sowie von der Zusammensetzung der Mineralwässer lassen sich im südlichen Teil Sibiriens folgende hydromineralen Gebiete aufzeigen (Tafel I):

1. Das Altai-West-Sajaner-Gebiet der Stickstoffthermen,
2. Das Ost-Sajaner-Gebiet der thermalen und kalten Kohlensäuerlinge,
3. Das Baikalseegebiet der Stickstoff- und Methanthermen,
4. Das Daurer-Gebiet der kalten Kohlensäuerlinge und lokaler Verbreitung der Stickstoffthermen.

**Das Altai-West-Sajaner-Gebiet** liegt vorwiegend westlich des Flusses Jenissei und umfaßt das Altai-Bergland und den West-Sajan. Die neotektonische Tätigkeit verlief im Altai-West-Sajaner-Gebiet nicht so intensiv, wie z. B. in der Baikalseezone, und der jüngste Vulkanismus fehlt durchaus, wodurch sich dieses Gebiet von dem benachbarten Ost-Sajaner hydromineralen Bereich unterscheidet. Die Thermalwasseraustritte sind hier nicht zahlreich. Im West-Sajan sind bisher nur zwei Thermalquellen (Tschulaksy am Fluß Bolschje Ury und der sogenannte

Gorjatschi Kljutsch, d. h. „Heißquelle“, bei den Quellflüssen des Abakan) festgestellt worden, obwohl es hier zweifellos noch mehrere Quellen gibt, die bis jetzt unbekannt blieben. Beide Quellen sind an die Zonen der tektonischen Brüche gebunden, die Granite und Granodiorite durchschneiden. An ihnen werden die bei der niedrigen Temperatur (von 16 bis 22 und bis 35,5° C) mit Stickstoff gasierenden Wässer herausgeführt (Tabelle 1)<sup>1)</sup>.

Einige Stickstoffthermenaustritte sind über die Grenzen von West-Sajan hinaus bekannt (Tafel I). Als eine dieser Quellen gilt Belokuricha, die Radonwässer mit einer Temperatur von 27 bis 48° C aus den Graniten herausführt. In Belokuricha besteht ein großer Kurort. Die Gesamtschüttung aller Bohrungen im Kurort wird auf 16 l/s geschätzt.

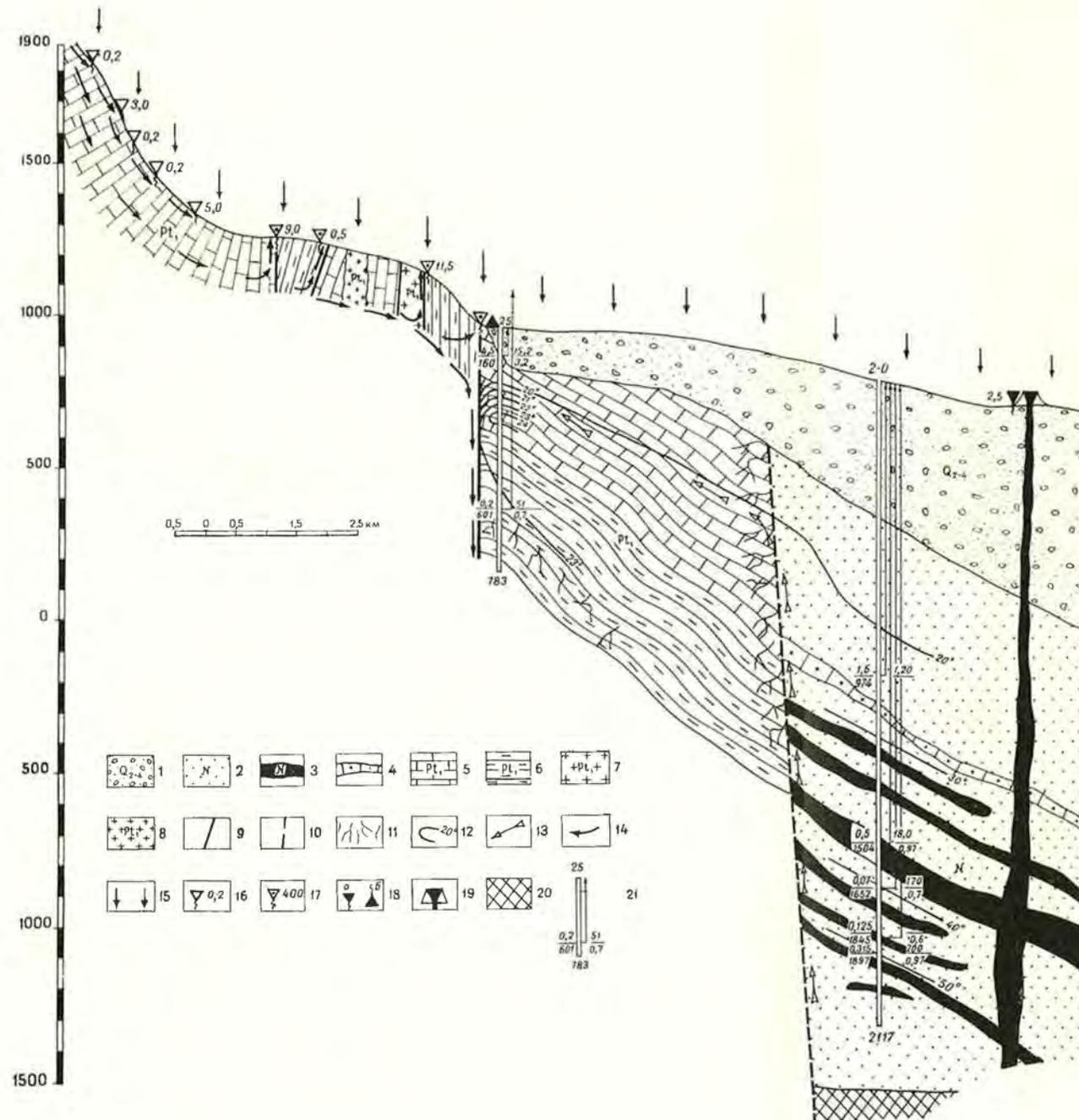
**Das Ost-Sajaner-Gebiet** umfaßt das nordwestlich und südöstlich vom Fluß Jenissei sich ausdehnende Ost-Sajan-Gebirge und seine Ausläufer. Zum Unterschied vom angrenzenden hydromineralen Baikal-Gebiet haben wir im Ost-Sajan-Bereich sowohl eine neotektonische Tätigkeit zu verzeichnen, die in der Gegenwart eine starke Erdbeben-tätigkeit bedingt, als auch eine weite Verbreitung des jungen Basaltvulkanismus. Magmatische Ausbrüche und erloschene Vulkane werden an vielen Stellen im Grenzbereich von Ost-Sajan verzeichnet. Die Zonen der tektonischen Brüche, an die die Thermenaustritte gebunden sind, stellen örtlich gut emanierende Kollektoren dar. Das alles führte dazu, daß die Thermalwässer im Ost-Sajaner-Gebiet häufig mit Kohlensäure oder Radon angereichert sind. Die Kombination von den Thermal-, Kohlendioxyd- und Radonwässern kann sogar in einer Quelle beobachtet werden.

Die Quellen mit sehr hoher Schüttung (Schumak und Tschöigan) sind Radon-Kohlendioxyd-Thermen mit einer Wassertemperatur von 34 bis 38° C. Das sind Gruppenustritte unterirdischer Wässer, die neben den Thermen kalte Kohlensäurewässer entlasten. Die erste Quellengruppe tritt aus den Karbonatgesteinen des Proterozoikums aus, die zweite Gruppe am Kontakt der präkambrischen Gneise und Marmore mit den Graniten des Paläozoikums. Beide Quellengruppen befinden sich in der Nähe der Ausbruchszone känozoischer Basalte an der Kreuzungsstelle von verschiedenen orientierten Zonen tektonischer Störungen. In der letzten Zeit sind im Kurort Arshan-Tunkinski, wo kalte Kohlensäurelinge schon längst bekannt waren, in den zermalmtten Kalksteinen des Proterozoikums durch Bohrungen in relativ geringer Tiefe (400 m) Kohlesäurethermen ohne Radon, aber mit ziemlich hoher Temperatur (bis 42° C) aufgedeckt worden (Tafel II).

Im Ost-Sajaner-Gebiet gibt es einige Quellen mit niedriger Wassertemperatur von 27 bis 35° C (Quellen Kishi-Chem, Choito-Gol, Cholun-Ugun und Dargal), in deren Gasbestand neben der Kohlensäure viel Stickstoff vorhanden ist (Tabelle 1). Soweit dies den reichlichen Kalk-

<sup>1)</sup> Tabelle 1 als Beilage am Schluß des Bandes.

Tafel II



Hydrogeologischer Schnitt durch den nördlichen Teil der Tunka-Senke im Bereich der Arshan-Tunkinski-Kohlensäurewasserlagerstätte (Schema der Bildungsverhältnisse von Kohlensäurewässern). Entwurf von I. S. LOMONOSSOW und B. I. PISARSKI, 1968.

1 — Geröll- und Sand-Schotter-Ablagerungen der quartären Formation, 2 — Sande und Sandgesteine des Neogens, 3 — Basaltlagen des Neogens, 4 — Sandsteine des Neogens, 5 — Kalksteine und Dolomite des Unteren Proterozoikums, 6 — kristalline Schiefer des Unteren Proterozoikums, 7 — Gneise des Unteren Proterozoikums, 8 — Hornblendegranite des Unteren Proterozoikums, 9 — wasserführende Brüche und tektonische Kontakte, 10 — Wege der aufsteigenden Bewegung der Kohlendioxydwässer durch vermutliche Bruchzone, 11 — Zonen stärkerer Klüftigkeit, 12 — Isothermen, 13 — Fließrichtung der Kohlendioxydwässer, 14 — Fließrichtung der Süßwässer vom Speisungsgebiet zu den Entlastungsstellen, 15 — atmosphärische Niederschläge, 16 — Süßwasserquelle vom Kluftwassertyp (Ziffer an der Quelle = Schüttung in l/s), 17 — Süßwasserquelle vom Gangwassertyp, 18 — Mineralquellen: a — Schwefelwasserstoffquelle, b — Säuerling, 19 — quartärer Vulkan, 20 — archaisches Fundament (nach den geophysischen Angaben), 21 — Bohrung (die Zahl oben = Nummer der Bohrung, unten = Tiefe in m; links: im Zähler = Schüttung in l/s, im Nenner = Tiefe der Wassererschließung in m; rechts: im Zähler = Tiefe des Wasserstandes in m, im Nenner = Mineralisation in g/l; Pfeil = Druck über dem Hangenden der wasserführenden Schicht).

tuffausscheidungen rings um die Quellen zu entnehmen ist, enthielten diese Mineralwässer früher viel mehr Kohlensäuregas. Es ist auch zu berücksichtigen, daß fast alle Quellen dieser Art an die Zertrümmernngszonen der nichtkarbonatischen Terrigen- und Eruptivgesteine gebunden sind, wobei es sich in der Regel um Quellen mit hoher Schüttung handelt.

„Reine“ Stickstoffthermen treten innerhalb der Grenzen von Ost-Sajan seltener auf. Als ihre Vertreter können die Radonwässer der Heilstätte Nilowa Pustyn gelten, die aus den zermalmtm Graniten austreten und deren Wassertemperatur 39 bis 43° C beträgt. Die Thermalwasseraustritte erreichen hier 21 l/s.

Im hydromineralen Ost-Sajaner-Gebiet sind kalte Kohlensäuerlinge sehr verbreitet. Die Gesamtzahl solcher Quellen beträgt 20. Einige Quellen führen Wässer mit einer Temperatur von 8 bis 14° C (die Quellen Uran-Sai, Arschantui, Werchni Kadyr-Os, Iswen u. a.). Unter Beachtung des abkühlenden Einflusses der Schichtenfolge der Ewigen Gefror-nis, die die Kohlendioxydwässer durchdringen, sind Quellen mit einer Wassertemperatur von mehr als 2 bis 4° C für anomal zu halten. In Anbetracht der Erfahrungen in Arshan-Tunkinski ist zu erwarten, daß hier durch Bohrungen noch einige Kohlensäurethermen entdeckt werden.

**Das Baikalg Gebiet der Stickstoff- und Methanthermen** umfaßt die sogenannte Baikalf riftzone. Sie erstreckt sich in einem Streifen vom Chubsugulsee in der Mongolei den Baikalsee entlang und weiter nach Nordosten bis zum Fluß Tschara. Hier ziehen sich die Gebirge Chamar-Daban, Primorski, Baikalski, Bargusinski, Werchneangarski, Muiski, Udokanski und andere hin, die durch große interalpine känozoische Senken, wie die „echte“ Baikalsenke und die Senken Tunka, Bargusin, Werchnjaja Angara, Muja, Tschara usw., getrennt wurden.

Die im späten Neogen entstandene und in der Gegenwart sich weiterentwickelnde Baikalf riftzone ist gekennzeichnet durch einen intensiven känozoischen Vulkanismus und bedeutende geothermische Anomalien. Mit der Riftzonenbildung ist die Entstehung der Baikalf- und Chubsugulseen und ihrer analogen „wasserfreien“ Becken verbunden.

Die Intensität der tektonischen Entwicklung der Baikalf riftzone bleibt in der gegenwärtigen Epoche nicht konstant, wovon die Erdbeben-tätigkeit dieser Region (hier finden häufig Erdbeben der Stufen IX bis X nach der Skala MSK-64 statt) und das Vorhandensein einer großen Zahl lebender Tiefenbrüche zeugen. Mit den Tiefenbrüchen sind Thermalwasseraustritte verbunden.

Die mit Stickstoff gasierenden Thermen sind im Baikalg Gebiet besonders weit verbreitet. Die Stickstoffthermen treten in den Fluß-tälern auf, von denen die Gebirge durchzogen sind, die aus den präkambri-schen, hauptsächlich sauren eruptiven und metamorphen Gesteinen zusammengesetzt sind (z. B. die Quellen Alla, Garga, Gusicha, Irkana,

Mujakan und andere). Sie treten auch am Ufer des Baikalsees zutage (Quellen Gorjatschinsk, Dawscha, Chakusy, Kotelnikowski und andere). Die Schüttung dieser Quellen schwankt gewöhnlich von 1 bis 10 l/s (Garga, Irkana und andere) und erreicht in einzelnen Fällen 20 und sogar 50 l/s (Gorjatschinsk, Chakusy). Durch Erschließungsarbeiten wurden drei weitere Vorkommen von Stickstoffthermen festgestellt. Es bestehen bereits einige Kurorte an diesen Vorkommen (Gorjatschinsk, Usch-Beldir) oder werden gebaut (Pitatelewo). Die Ergiebigkeit der Thermalwässer bei der Lagerstätte Usch-Beldir (Figur 1) wird auf 8 l/s geschätzt, an der Lagerstätte Pitatelewo bis 36 l/s. Die Wassertemperatur schwankt von 20 bis 84° C. Folgende Quellen haben die höchste

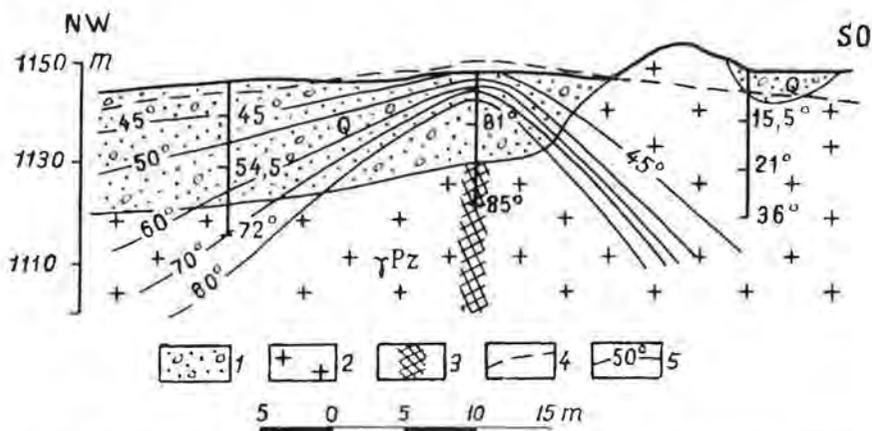
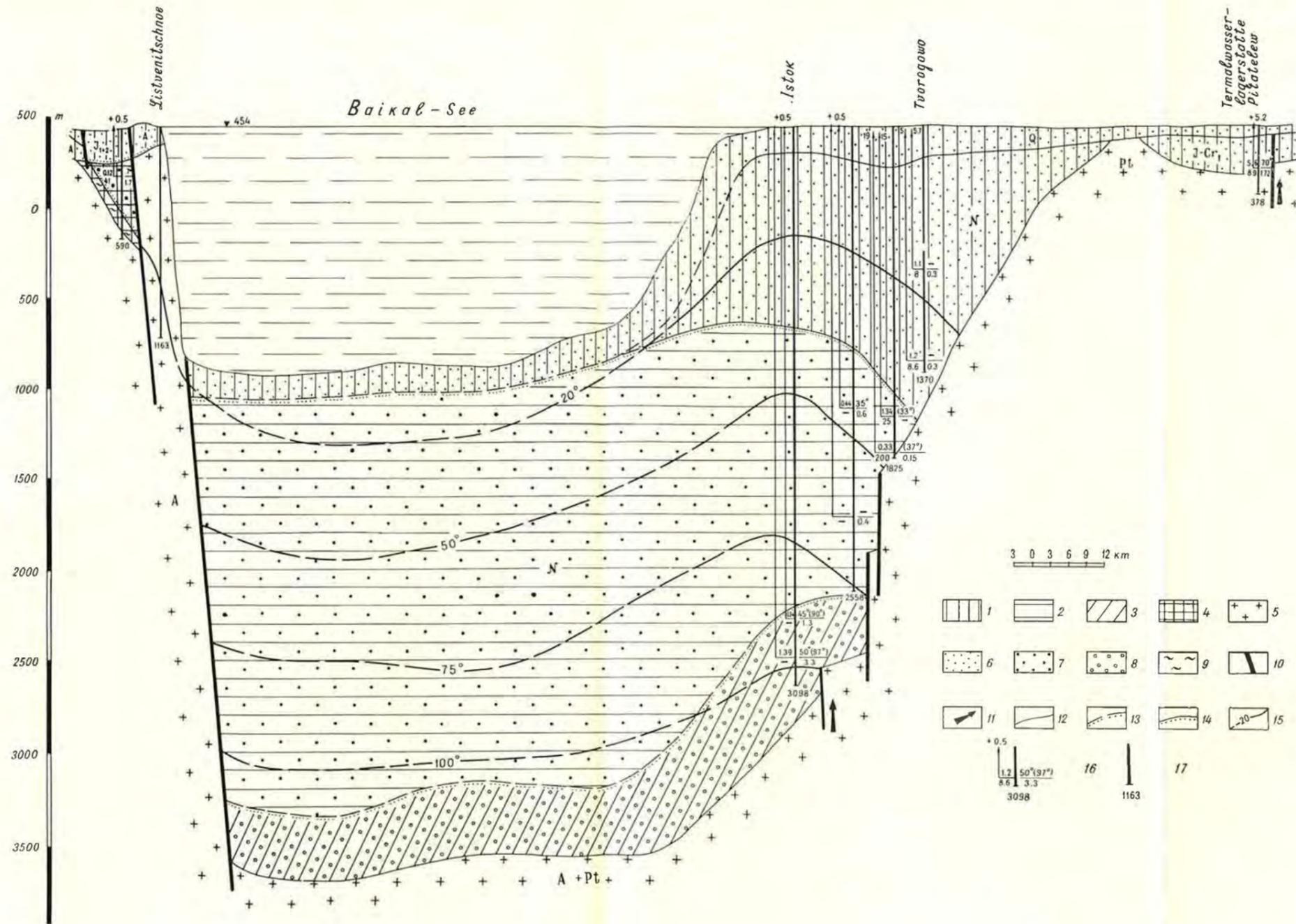


Fig. 1: Geothermische Verhältnisse der Thermalwasserlagerstätte Usch-Beldir (nach den Angaben von W. E. SIDOROW, 1966). 1 — Alluvium, 2 — Eruptivgesteine, 3 — Zermalmungszone, 4 — Lage der piezometrischen Oberfläche der Thermalwässer, 5 — Isothermen.

Wassertemperatur: Usch-Beldir (84° C), Mogoi (82° C), Garga (76° C) und Alla (74° C).

Die mit Methan gasierenden Thermalwässer sind mit kontinentalen terrigen-kohlenführenden Ablagerungen verbunden, aus denen die känozoischen Senken vom Baikaltyp gebildet sind. Die Methanthermen treten in der Regel nicht an der Oberfläche auf, sie werden durch Bohrungen in Tiefen von 200 m bzw. 1000 bis 3000 m angefahren. In der Tunkinischen Senke sind Methanthermen mit einer Temperatur von 38 bis 41° C und einer Ergiebigkeit von 8 l/s durch die Bohrung Tunka-1 in der Tiefe von 728 bis 766 m in den verschiedenenkörnigen Sanden des Pleistozäns und von 766 bis 826 m in den Miozän-Quarzsanden angetroffen worden. In der Baikalsenke, an der Mündung der Selenga, ist in den Miozän-Sanden in der Tiefe 2732 bis 2925 m Methanwasser mit einer Temperatur bis zu 100° C entdeckt worden. Die Schüttung dieser

Tafel III



Hydrochemischer Schnitt durch den Baikalsee vom Ausfluß der Angara bis zur Thermalwasserlagerstätte Pitalewo.

Hydrochemische Zonen: 1 — Süßwasser vom Hydrokarbonat-, meist Kalziumbestand mit der Mineralisation < 0,5 g/l, 2 — Hydrokarbonat-Natrium-Süßwasser mit der Mineralisation bis 1,0 g/l, 3 — Chlorid-Natrium-Salzwasser mit der Mineralisierung > 4 g/l, 4 — Hydrokarbonat-Natriumwasser mit der Mineralisierung < 2 g/l, 5 — praktisch entwässerte eruptive und metamorphe Gesteine des Archäikums-Proterozoikums.

Benennungen unterirdischer Wässer nach dem Gasbestand: 6 — Sauerstoff-Stickstoff-Wässer, 7 — Stickstoffwässer, 8 — Schwefelwasserstoff-Methan-Wässer, 9 — Methanwässer.

Andere Bezeichnungen: 10 — vermutliche tektonische Störungen, 11 — Stellen des Zustusses von Thermalwässern aus den Gesteinen des präkambrischen Fundaments, 12 — Grenzen verschiedener stratigraphischer Gliederungen, 13 — vermutliche Grenzen der hydrochemischen Zonen, 14 — festgestellte Grenzen der hydrochemischen Zonen, 15 — Isothermen (vermutliche Isothermen sind durch eine Strichlinie gezeigt), 16 — Bohrung (Ziffer unten = Tiefe in m; links: im Zähler = Ergiebigkeit in l/s, im Nenner = Tiefe des Wasserstandes in m; rechts: im Zähler = Wassertemperatur bei der Quellschüttung in °C, und in Klammern in den Abständen der Probeentnahme; im Nenner = Wassermineeralisation in g/l; Pfeil = piezometrischer Druck, die Zahl oben das piezometrische Niveau in m).

Bohrung betrug bei der Eruption 1,3 l/s (Tafel III). Manchmal werden Methanthermen in den Bruchzonen gefunden, die die Senken begrenzen (Bohrungen am Ufer des Baikalsees bei dem Dorf Suchaja).

Zum Unterschied vom Ost-Sajaner-Gebiet fehlen im größten Teil des Baikal-Gebietes Austritte der Thermalkohlensäuerlinge. Die letzteren werden nur am nordöstlichen Rande der Baikalriftzone in der Bergeinfassung der Tschara-Senke angetroffen (Quellen Syni, Traverfinowy und andere). Hier sowie an der südwestlichen Riftflanke (in Arschan) sind Kohlensäurethermen an den Bereich der vor kurzem erloschenen vulkanischen Tätigkeit gebunden, die sich vom Ende des Neogens bis ins Holozän erstreckte.

Außer den Thermalwässern sind im Baikal-Gebiet nur einige Austritte kalter schwefelwasserstoffhaltiger (Quellen Pinnesjarikta, Ust-Kotera und andere) und eisenhaltiger (Onguren, Chongarula) Wässer bekannt.

**Das Daurer-Gebiet kalter Kohlensäuerlinge und lokaler Verbreitung der Stickstoffthermen** grenzt an den Osten des hydromineralen Baikal-Gebietes an. Es liegt in den Flußbecken von Selenga und Witim und umfaßt die Quellflüsse des Amur.

Als größte orographische Einheiten gelten das Witimsker Hochland, das Jablonowy-Gebirge und die westlichen Ausläufer des Stanowoi-Gebirges, die aus den metamorphen und magmatischen Gesteinen des Präkambriums, Proterozoikums und Mesozoikums aufgebaut sind. Eine spezifische Besonderheit des geologischen Baues des Daurer-Gebietes ist die Entwicklung zwischengebirgiger Einsenkungen, die durch mesokänozoische sedimentär-vulkanogene Komplexe und vulkanische Ausbrüche gebildet worden sind, die im Neogen und Pleistozän vor sich gingen. Der letzte Umstand verursachte wahrscheinlich eine weitere Entwicklung der Kohlensäuerlinge, deren Zahl 300 überschreitet. Die Kohlendioxidwässer zeichnen sich in der Regel durch niedrige Temperaturen (1 bis 5° C) aus. Stellenweise treten auch kalte Radonwässer mit niedrigem Mineralgehalt und einem Radongehalt von 5 bis 10, ja bis 100 m  $\mu$ C/l und mehr auf. Außer den kalten Kohlendioxid- und Radonwässern sind in einzelnen Orten Stickstoffthermen und kohlen-säurearme Thermen verbreitet. Die kalten Kohlendioxidwässer des Daurer-Gebietes bilden die hydromineralen Basis für in der Sowjetunion gut bekannte Kurorte, wie z. B. Darassun, Kuka, Urgutschan, Schiwanda und Jamarowka. Kalte Radon-Kohlendioxidwässer werden im Kurort Molokowka unweit von Tschita balneologisch genutzt.

Die Daurer Thermalwässer treten an der Oberfläche in zwei territorial getrennten Gebieten auf (L. M. ORLOWA, 1966): Im Süden, beim Oberlauf der Flußbecken von Ingoda und Tschikoi (Quellen Bylyra, Kunalei, Jasytai, Werchneingodinski und andere) und im Südosten im Flußbecken des Gasimur (Jamkun, Aktagutschinski, Nikolaewski und andere). Für die Thermen dieser Gebiete ist es charakteristisch, daß

vielerorts im Wasser ein erhöhter Radongehalt und in einzelnen Fällen Kohlensäuregasgehalt vorhanden sind. So liegt z. B. im Flußbecken des Gasimur der Kurort Jamkun, dessen thermale Kohlendioxyd-Radon-Wässer für balneologische Zwecke genutzt werden.

## Gasbestand und chemische Zusammensetzung der Thermen

Laut der in der Sowjetunion und in den meisten Ländern der Welt angenommenen Temperaturskala der Naturwässer gilt die Temperatur von 20° C als Grenze zwischen den thermalen und kalten Wässern. Alle unterirdischen Wässer im Süden Sibiriens, deren Temperatur mehr als 20° C beträgt, gehören der Kategorie der Thermalwässer an, und je nachdem, ob dieser oder jener Gasbestand überwiegt, können sie in Stickstoff-, Kohlensäure-(Kohlendioxyd-) und Methanthermen eingeteilt werden, wobei sehr erhebliche Unterschiede bestehen. Eine weitere Gliederung der Thermalwässer beruht auf dem Übergewicht im Salzgehalt einzelner Mikro- und Makrokomponenten, die den Wassertyp bestimmen.

In dieser Arbeit wird von den Autoren keine ausführliche Klassifikation der Thermalwässer gegeben, darum werden hier nur die Grundtypen der Thermen behandelt, zwischen denen es eine Reihe der durch ihre spezifischen Besonderheiten sich kennzeichnenden Übergangsabarten gibt.

Unter den Thermalwässern Südsibiriens sind die **Stickstoffthermen** am weitesten verbreitet. Bei geringer Gassättigung (20 bis 35 mg/l nicht übersteigend) beträgt der Stickstoffgehalt in spontanen und gelösten Gasen in der Regel 85 bis 95%, bzw. nie weniger als 78%, was dem Stickstoffgehalt in bodennahen Schichten der atmosphärischen Luft entspricht. In einigen Fällen besteht der Gasgehalt 99 bis 100% aus dem Stickstoff (Quellen Gusicha, Baunt, Maimalysch und andere). Außer dem Stickstoff sind Methan (bis 15%), Sauerstoff (bis 20%), Schwefelwasserstoff und Edelgase vorhanden (Tabelle 1, 2)<sup>\*)</sup>. Die Radonkonzentration ist nicht groß und liegt gewöhnlich in den Grenzen des Nulleffekts (Tabelle 2), selten übersteigt sie 3 bis 6,5 m $\mu$ C/l (Quellen Garga, Nilowa Pustyn, Belokuricha, Irkana). Die maximale Radonkonzentration (9 bis 10 m $\mu$ C/l) wurde in Belokuricha und Nilowa Pustyn festgestellt. Der Schwefelwasserstoffgehalt schwankt von 1 bis 2 bis 12 bis 30 mg/l.

Bemerkenswert ist der niedrige Salzgehalt der Stickstoffthermen, der sich von 0,18 g/l (Quellen Semiosjerski, Jasowka und andere) bis 1,1 g/l (Quellen Garga, Nilowa Pustyn, Engorboi) und nur vereinzelt bis 2 g/l (Bohrung 52 im Kurort Pitatelewo) bewegt. Alle Stickstoffthermen führen alkalische Wässer mit einem pH-Wert von 7 bis 9,2. Zum Unterschied von den Stickstoffthermen der meisten Berggebiete

<sup>\*)</sup> Tabellen 1 und 2 als Beilagen am Schluß des Bandes.

der Welt, insbesondere der gegenwärtig tätigen Vulkangebiete, enthalten die Stickstoffthermen Südsibiriens verhältnismäßig wenig Chlor, das im Anionenteil nur eine untergeordnete Rolle spielt. Der Chlorgehalt übersteigt in der Regel 10 bis 15 mval-% nicht, und nur in einzelnen Fällen erreicht er 26 bis 27 mval-% (Quellen Werchnetscharski, Solotoi Kljutsch, Tschulaksy, Tolmatschewo). Eine Ausnahme bildet nur das Wasser der Thermalquelle Olekma, in dessen Salzgehalt das Chlor die anderen Anionen überwiegt (Tabelle 2).

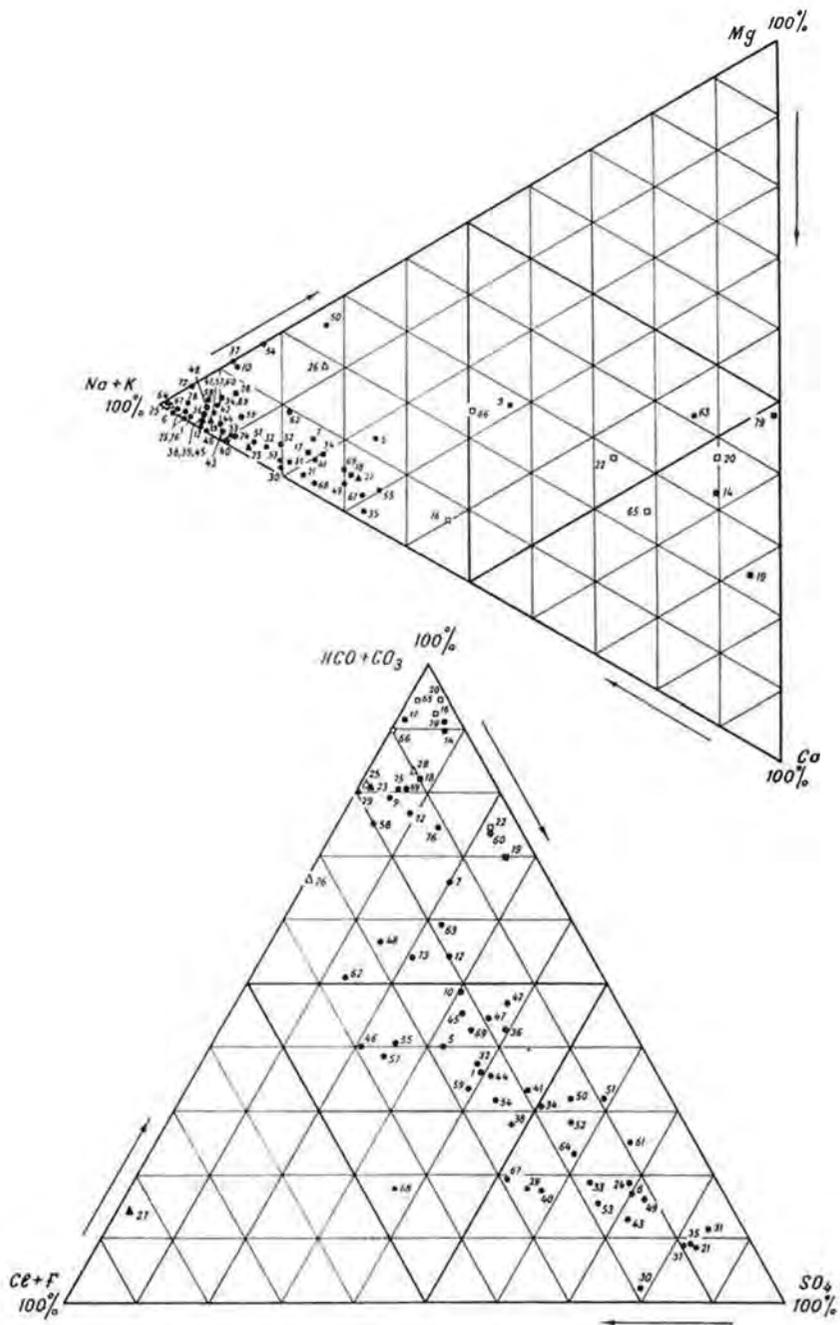
Die zweite spezifische Besonderheit besteht darin, daß die Stickstoffthermen einen ziemlich niedrigen Gehalt an alkalischen Erden aufweisen. Alle Stickstoffthermen gehören in der Regel zu den Natriumthermen (70 bis 90 mval-%). Nur zwei Quellen (Tschelolek und Abakan) kennzeichnen sich im Kationenteil durch das Übergewicht von Kalzium und Magnesium über das Natrium und Kalium.

Unter Berücksichtigung der oben aufgezählten Besonderheiten können alle Stickstoffthermen Südsibiriens nach der chemischen Zusammensetzung in drei Grundtypen gegliedert werden: 1. Sulfat-Natrium-Thermen, 2. Hydrokarbonat-Sulfat- und Sulfat-Hydrokarbonat-Natrium-Thermen, 3. Hydrokarbonat-Natrium-Thermen.

Sulfat-Natrium-Thermen gelten als höchstmineralisierte Stickstoffthermen. Ihr Mineralgehalt schwankt von 0,3 bis 0,5 und 1,1 bis 2,0 g/l (Tabelle 2). Der Sulfationgehalt schwankt von 60 bis 80 mval-% und wird sogar geringer (bis 50 mval-%), wenn der Chlorgehalt bis 20 bis 25 mval-% ansteigt (Quellen Bystrinski und Werchnetscharski). Das Hydrokarbonat erreicht nur 5 bis 16 mval-% (Fig. 2). Im Kationenteil überwiegt das Natrium, dessen Gehalt mit dem Kaliumgehalt nicht selten 90 bis 98 mval-% beträgt.

Von den Stickstoff-Sulfat-Natrium-Thermen kann nur das Quellwasser von Tarys und Garga den schwefelwasserstoffhaltigen Thermen zugerechnet werden, weil der Schwefelwasserstoffgehalt 11 bis 12 mg/l erreicht.

Den Sulfatthermen stehen thermale Mischwässer nahe, die nach der chemischen Zusammensetzung zu den komplizierten Hydrokarbonat-Sulfat- oder Sulfat-Hydrokarbonat-Natrium-Thermen gehören. Diese Thermen sind im Gegensatz zu „reinen“ Sulfat-Natrium-Thermen durch niedrigen Mineralgehalt (0,2 bis 0,6 g/l) und erhebliche Schwankungen im Prozentgehalt der Sulfate (von 25 bis 65 mval-%) und der Hydrokarbonate (von 20 bis 42 mval-%) gekennzeichnet. Die Besonderheit des untersuchten Thermentypus besteht darin, daß diese Thermen einen ziemlich hohen Fluorgehalt aufweisen, der 20 bis 28 mg/l erreicht, was beim niedrigen Mineralgehalt 20 bis 26 mval-% ausmacht (Quellen Mujakan, Baunt und andere). Die durch Fluorid angereicherten Thermen können als mit den Fluoridthermen Bulgariens sehr verwandte eigenartige Abart der Stickstoffthermen betrachtet werden. Im Wasser einiger Quellen des hier behandelten Typus (Kutschechir, Alla, Usch-Beldir, Umchei und andere) übersteigt der Gehalt an Schwefelwasser-



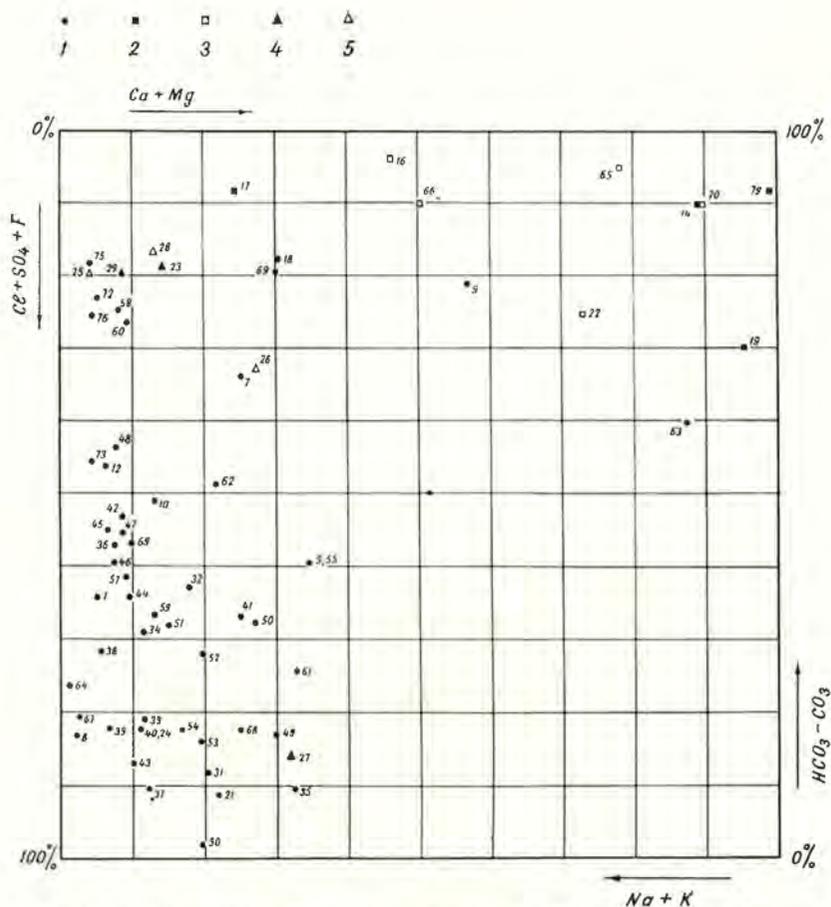


Fig. 2: Die chemische Zusammensetzung der Thermalwässer. Arten der Thermen: 1 — Stickstoffthermen, 2 — Kohlendioxyd-Stickstoff- und Stickstoff-Kohlendioxyd-Thermen, 3 — Kohlendioxydthermen, 4 — Methanthermen, 5 — Stickstoff-Methan-Thermen.

stoff 10 mg/l, und sie können den schwefelwasserstoffhaltigen Thermen zugerechnet werden (Tabelle 2).

Der nächste Typ der Stickstoffthermen vereinigt Wasser, in deren Zusammensetzung das Hydrokarbonation überwiegt. Sie sind durch den niedrigsten Salzgehalt charakterisiert, der von 0,18 bis 0,47 g/l schwankt. Der Hydrokarbonationgehalt erreicht 80 mval-% und der Alkaliengehalt bis 96 mval-%. Nur in zwei der oben erwähnten Fälle spielen Alkalien eine untergeordnete Rolle und herrschen im Kationenteil die Ionen von Magnesium und Kalzium vor. Die Hydrokarbonat-

Kalzium-Thermen von Tschelolek und Abakan scheinen keinen selbständigen Typ zu bilden. Diese Thermen entstehen durch Vermischung mit den Wässern von oberen Wasserschichten, die den gleichen Gehalt aufweisen.

Die Stickstoffthermen sind durch verschiedene Mikrokomponenten angereichert. Über 50 Grundstoffe wurden in den Stickstoffthermen durch verschiedene Untersuchungsmethoden festgestellt. Die größte Zahl der Mikrokomponenten wird in den Sulfat-Natrium-Thermen angetroffen, dabei enthalten sie Strontium bis 7,9 mg/l (Bohrung 52 im Kurort Pitatelewo) und Lithium bis 1,5 mg/l (Quelle Garga), weniger verbreitet sind Fe, Br, Mo, Ba, Mn, W, Ti (Zehntel- und Hundertstel-mg/l), Ge, Zn, Pb, Au und andere (Tausendstel-mg/l). Die Hydrokarbonat-Sulfat- und Sulfat-Hydrokarbonat-Natrium-Thermalwässer sind gekennzeichnet durch eine relative Armut von Mikrokomponenten. Diese Wässer enthalten weniger Lithium (0,03 bis 0,18 mg/l) und Strontium (0,07 bis 0,3 mg/l) und sind auch durch sehr geringe Ti-, Mo-, Ge- und Ba-Gehalte gekennzeichnet (Hundertstel- und seltener Zehntel-mg/l). Die Thermen des Hydrokarbonat-Natrium-Typus weisen den niedrigsten Mikroelementgehalt auf. Im Wasser der Thermalquellen des Bereiches Ingoda-Tschikoi wurden Zn, W, Mo, As, Be, Ge, Ba, Cr, Cu, Pb und andere Mikroelemente nur in geringfügiger Menge entdeckt (L. M. ORLOWA, 1966). Die Stickstoffthermen sind durch Armut an Uran und Radium gekennzeichnet.

Allen oben beschriebenen Stickstoffthermen ist gemeinsam, daß sie einen ziemlich hohen Gehalt an Kieselsäure haben. Der höchste  $H_2SiO_3$ -Gehalt (130 bis 180 mg/l) ist im Wasser der Bohrungen im Kurort Usch-Beldir zu finden. Durchschnittlich schwankt der Kieselsäuregehalt im Wasser der Stickstoffthermen von 30 bis 80 mg/l. Je nach der Temperaturabnahme mit der Annäherung zur Erdoberfläche und der Vermischung mit den kalten Wässern vollzieht sich eine  $SiO_2$ -Fällung aus den Thermalwässern in einer bestimmten Tiefe. Als Beweis dafür sind die in Usch-Beldir durch Bohrungen in den Tiefen von 20 bis 30 m aufgedeckten Geysiritablagerungen, die gegenwärtige alluviale Ablagerungen verfestigen, anzusehen. Die Erforschung von Eh in den Stickstoffthermen von Nilowa Pustyn zeigte, daß eine starke Klüftigkeit der Nebengesteine und der Infiltrationswasserzufluß das Oxydations-Reduktions-Gleichgewicht der Oxydierung näherbringen. In großen Tiefen im Reduktionsmedium gebildet, ändern Stickstoffthermen den Wert des Potentials von + 35 mv (in der Tiefe von 100 bis 150 m) bis + 300 mv an der Oberfläche.

**Die Kohlendioxydthermen** und auch die Übergangsarten (Übergänge von Stickstoff- zu Kohlendioxydthermen) kommen im Bereich der Bergräume im südlichen Teil Sibiriens viel seltener vor, besonders im Vergleich zu den mit Stickstoff gasierenden Thermen.

Wie aus der Benennung ersichtlich ist, dominiert im Gasbestand das Kohlensäuregas (Tabelle 1 und 2). Seine Gewichtskonzentration in den Thermalwässern von Tschöigan und Schumak beträgt 500 bis 1000 mg/l, die Thermen von Arschan und Travertinowy sind noch mehr mit Kohlensäure gesättigt (bis 1400 bis 2000 mg/l), und das Quellwasser von Syni enthält mehr als 2000 mg/l. Der Stickstoff und der Sauerstoff spielen im Gasgehalt eine sekundäre Rolle, und manchmal sind sie im Gasbestand nicht vorhanden. Wie schon erwähnt, kennzeichnen sich Kohlendioxydthermen örtlich durch eine höhere Radonkonzentration: in Schumak 35 bis 55  $\mu\text{C/l}$  und in Tschöigan 4,0 bis 15,5  $\mu\text{C/l}$ .

Tschöigan und Schumak sowie einige Quellen im nördlichen Teil des Baikargebietes im Flußbecken von Eimnach (das sind Syni, Travertinowy und Plotinny) stellen Gruppenaustritte unterirdischer Wässer mit hoher Schüttung dar. Hier werden nicht nur Kohlendioxydthermen, sondern auch kalte Kohlensäuerlinge entlastet. Die Tschöigauer Gruppe besteht aus 30 Kohlensäuerlingen mit einer Wassertemperatur von 9 bis 10 bzw. 35 bis 38° C mit einer Gesamtschüttung von 50 l/s. Nach den geologisch-strukturellen Besonderheiten erinnert dieses Gebiet an die Umgebung des Badeortes Františkovy Lázně im Nordwesten der Tschechoslowakei; wie in Soos steigen hier auch „trockene“ Kohlensäuregasstrahlen auf. Die Schumaker Gruppe zeichnet sich dadurch aus, daß man dort insgesamt 70 Quellen mit einer Wassertemperatur von 18 bis 19 bzw. 37° C und einer Gesamtschüttung von 7 bis 8 l/s zählt.

In der Nähe der Kohlensäuerlinge liegen weite Felder des Kalktuffs, der sich aus den kalten Kohlendioxydwässern und aus den Thermen ausscheidet. Die mächtigsten Tufflager (10 m und mehr) werden rings um die Thermalquellen von Tschöigan beobachtet; im Bereich rezenter Vulkane am Fluß Eimnach erreichen sie nur eine Mächtigkeit von weniger als 1,5 bis 2 m. Die Travertine von Tschöigan, Schumak und Arschan-Tunkinski gleichen in der Zusammensetzung den Karbonatgesteinen, aus denen die Kohlendioxydwässer austreten.

Der Mineralisierungsgrad ist eine Besonderheit, die die Kohlensäurethermen von den Stickstoffthermen unterscheidet. Die Kohlensäurethermen weisen einen höheren Salzgehalt auf (Tabelle 2), und zwar 1,2 bis 5,5 g/l. Der zweite Unterschied besteht im pH-Wert, der charakterisiert ist durch eine schwach saure Reaktion und zwischen 6,2 und 6,8 liegt.

Die Kohlensäurethermen kennzeichnen sich durch das Übergewicht von Hydrokarbonaten im Anionenteil (75 bis 96 mval-%), die Sulfate und insbesondere das Chlor spielen nur eine sekundäre Rolle (Tabelle 2 und Fig. 2). Der Cl-Gehalt übersteigt gewöhnlich 3 bis 4 mval-% nicht, und nur im Quellenwasser von Travertinowy erreicht der Chlorgehalt ungefähr 10 mval-% (247 mg/l). Der Kationenteil ist sehr unter-

schiedlich. In Schumak, Syni und Arshan-Tunkinski dominiert Kalzium, es gibt hier bedeutend weniger Magnesium (24 bis 38 mval-%) und Natrium (6 bis 26 mval-%). Doch einzelne Quellen der Schumacker Gruppe, die in Tabelle 2 nicht dargestellt sind, weisen den Hydrokarbonat-Natrium-Gehalt auf. Die Thermalwässer von Tschöigan enthalten Natrium und Kalzium in ungefähr gleichen Prozentverhältnissen, nur im Wasser der Travertinowy-Quelle, wo die höchste Mineralisierung verzeichnet wird, überwiegt das Natrium über das Kalzium und Magnesium. Die Kohlendioxyd-Stickstoff-Thermen und Stickstoff-Kohlendioxyd-Thermen stellen eine Übergangsart dar, die nach den Beschaffenheiten und dem Gehalt sowohl den thermalen Stickstoffwässern, als auch den thermalen Kohlensäurewässern nahekommen.

Im Gasbestand der Thermalwässer dieses Typus dominiert der Stickstoff, obwohl der Kohlensäuregehalt mehr als 20% beträgt und die Thermen von Cholun-Ugun sogar viel mehr Kohlensäure als Stickstoff enthalten. Die Gewichtskonzentration freier Kohlensäure ist verhältnismäßig niedrig und schwankt zwischen 6 bis 23 und 190 bis 220 mg/l. Außer dem Stickstoff und dem Kohlensäuregas wurde noch Sauerstoff festgestellt. In der Quelle Choito-Gol sind die Thermen schwefelwasserstoffarm ( $\text{H}_2\text{S} = 1$  bis 2 mg/l), und in Jamkun und Kishi-Chem gibt es Radonthermen, deren Radonkonzentration mehr als 100,0  $\mu\text{C/l}$  (Jamkun) erreicht.

Der Salzgehalt von kohlensäurearmen Thermen ist etwa 0,8 bis 1,3 g/l. Nach der überwiegenden Zusammensetzung sind es Hydrokarbonat-Natrium-Wässer (Quellen Dargal und Choito-Gol) oder Kalziumwässer (Kishi-Chem und Jamkun). Die Reaktion der kohlensäurearmen Thermen nähert sich der neutralen ( $\text{pH} = 6,9$  bis 7,1).

Der Gehalt an Mikroelementen der kohlensäuren und der von ihnen abgeleiteten Thermen ist anders im Vergleich zu den oben behandelten Stickstoffthermen. Vor allem sind sie durch relative Armut von Fluorid und stellenweise von Kieselsäure gekennzeichnet. Die letztere (d. h.  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ) hat nur manchmal die Konzentration bis 100 mg/l. Die Kohlendioxydthermen enthalten viel mehr Kalium (bis 50 mg/l) und Brom (bis 7 mg/l), was wahrscheinlich durch die maximale Mineralisierung erklärt werden kann. Aus diesem Grunde sind der Eisengehalt (das Ausfallen des Eisens hängt mit der Abnahme des  $\text{CO}_2$  im Wasser zusammen) und die Strontium-, Lithium- und Borkonzentration auch ziemlich hoch. Bei der Untersuchung des Oxydations-Reduktions-Potentials ist in den Kohlensäurethermen von Tschöigan ( $E_h = + 320$  mv) und Schumak ( $E_h = + 450$  mv) ein oxydierendes Medium verzeichnet worden. Unter solchen Verhältnissen migrieren viele Metalle, und die Auslaugung der Gesteine verläuft intensiv.

**Die Methanthermen** sind im Süden Sibiriens wenig verbreitet. Sie wurden durch Bohrungen in den Senken Tunka, Ust-Selenga und Bargusin aufgeschlossen. Zum Unterschied von den hier behandelten

Stickstoff- und Kohlensäurethermalwässern sind die Methanthermen durch höhere Gassättigung gekennzeichnet, die bei der Bohrung Tunka-1 225 mg/l beträgt. Im Gasbestand der hier untersuchten Thermen dominieren Methan und schwere Kohlenwasserstoffe (bis 80 bis 90%), neben denen der Stickstoff (in ziemlich großer Menge — bis 47%), das Kohlendioxyd, der Wasserstoff und seltene Edelgase vorhanden sind. Die Gewichtskonzentration des Schwefelwasserstoffes übersteigt 5 mg/l nicht. Die Methanthermen sind arm an Radon, dessen Gehalt in den Grenzen des Nulleffekts liegt. Die Mineralisierung der Thermen nimmt mit der Tiefe zu. Sie beträgt in der Regel weniger als 1 bis 1,2 g/l, aber in den tiefen Schichten erreicht sie 3 bis 3,5 g/l. Sowohl die Methanthermen als auch die Stickstoffthermen gehören zu den alkalischen Wässern, deren pH-Wert von 7,2 bis 8,5 schwankt.

Nach der Zusammensetzung können die Methanthermen als Hydrokarbonat- oder Chlorid-Natriumwässer (Tabelle 2) betrachtet werden, d. h., sie weisen erhebliche Unterschiede nicht nur von den Stickstoff-, sondern auch von den Kohlensäurethermen auf. Der Hydrokarbonatgehalt erreicht 57 bis 97 mval-%, der Natriumgehalt 75 bis 90 mval-%. Diese Wässer sind durch einen ziemlich niedrigen Sulfatgehalt (bis zu dessen Fehlen) charakterisiert, aber der Cl-Gehalt ist ziemlich hoch, dominiert aber nur in einzelnen Fällen. Chlorid-Natrium-Methanthermen mit einem Salzgehalt von 3 g/l sind z. B. an der Mündung der Selenga durch die Bohrung Istok-3 in einer Tiefe von 2732 bis 2925 m gefunden worden.

Die Mikrokomponentenzusammensetzung der Methanthermen ist wenig untersucht. In den Thermen wurden durch Spektralanalyse Al, Cu, Ti, Ni, Mn, Sr, Li und noch einige Elemente festgestellt. Die Methanthermen sind durch einen ziemlich geringen Kieselsäuregehalt charakterisiert. In den Methanthermen der Bohrung Tunka-1 übersteigt die  $H_2SiO_3$ -Konzentration 40 mg/l nicht.

## Geochemische Aspekte der Genese der Thermen

Die Feststellung der Bildungsverhältnisse der Thermalwässer in den Bergräumen Südsibiriens, in dem außerhalb des Gebietes des gegenwärtigen Vulkanismus gelegenen Territorium, ist von außerordentlich großer theoretischer und praktischer Bedeutung. Diese Frage zog die besondere Aufmerksamkeit der Hydrologen im Laufe der letzten Jahrzehnte auf sich, aber bis zur Gegenwart gibt es Meinungsverschiedenheiten in der Frage der Genese der Thermen. Einige Forscher, die den Ursprung des bedeutendsten Teils der thermalen Naturwasservorräte durch Infiltration anerkennen, vermuten, daß sich an ihrer Bildung Magmatogenwässer oder „juvenile“ Wässer nach der Terminologie von E. SUESS (1902) beteiligen, die mit den Magmaherden oder mit dem Metamorphismus der Gesteine verbunden sind (V. G. ТКАТЧУК, 1958 und andere). Andere Forscher verneinen irgendwelchen Anteil der

Magmatogen- oder Metamorphogenkomponenten an der Thermenbildung (W. A. KRASSINZWA, 1955; E. A. BASKOW, G. I. KLIMOW, 1963).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben wir keine Möglichkeit, das komplizierte Problem der Thermenentstehung eingehend zu behandeln, darum beachten wir nur jene Aspekte, die sich aus der Analyse der Geochemie der Thermalwässer ergeben und das Problem ihrer Genese von einem anderen Standpunkt als früher beleuchten.

Eine bedeutende Rolle in der Bildung der Thermalwässer Südsibiriens spielen die geologischen Verhältnisse. Die Besonderheiten des geologischen Baues des behandelten Territoriums verursachten die Verbreitung von drei Gruppen der Thermen — der Stickstoff-, Kohlendioxyd- und Methanthermen. Die Stickstoffthermen sind vorwiegend innerhalb der Baikalfurchezone verbreitet, wo besonders deutlich die neotektonische Tätigkeit zutage tritt, die mit den jungen Tiefenbrüchen verbunden ist. Thermale Kohlendioxydwässer sind an die Stellen mit der vor kurzem erloschenen vulkanischen Tätigkeit gebunden, Methanthermen aber sind ausschließlich in den Senken entwickelt, die durch kanozoische kohlenführende Ablagerungen ausgefüllt sind.

Obwohl die geologischen Verhältnisse in der Thermalwasserbildung des behandelten Territoriums eine gewisse Rolle spielen, ist die Frage von der Genese der Thermen wenig erforscht; es blieb bisher ungeklärt, welchen Anteil an der Zusammensetzung der Thermen Infiltrations-, Magmatogen- („juvenile“) und Sedimentationswässer nehmen. Um diese Frage beantworten zu können, ist es notwendig, nicht nur die Ergebnisse der Erforschung der Gas-, Salz- und Mikrokomponentenzusammensetzung, sondern auch die Isotopenzusammensetzung der Thermen in Betracht zu ziehen.

Um die Isotopenzusammensetzung des Wassers zu erforschen, wurden von den Thermalquellen, die sich durch sehr unterschiedliche Zusammensetzung des Wassers kennzeichnen, Proben für die Bestimmung des  $^2\text{H}$ - (Deuterium-) und  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes entnommen und analysiert.

Das Deuterium wurde mittels der Fotoneutronmethode in zwölf Wasserproben bestimmt. Die Analysen wurden vom Kandidaten der Wissenschaften W. N. SOIFER (Moskau) ausgeführt. Als Standard gilt das Wasser der Moskauer Wasserleitung mit einem absoluten Deuteriumgehalt von  $0,0147 \pm 0,0005$  Atomprozent.

Die Deuteriumkonzentration in den nach dem Gas- und Salzgehalt verschiedenartigen Thermen erreicht 0,85 bis 0,98 Quoten der für den Standard angenommenen Einheit (Tabelle 3). Die festgestellten Werte der Deuteriumkonzentration in den Thermalwässern stehen der Deuteriumkonzentration im Wasser des Baikalsees, der Flüsse Sibiriens, der atmosphärischen Niederschläge und der Quellen der Speisungsgebiete sehr nahe. So schwankt die Deuteriumkonzentration in den Regenwässern am Baikalsee von 0,98 bis 1,01 (in bezug auf den Standard), in den Wässern von Jenissei und Angara 0,93 bis 0,94, und im

Tabelle 3: Der  $^2\text{H}$ -Gehalt der Wässer in den Berggebieten Südsibiriens

Nummer auf der Karte	Ort und Datum der Probenentnahme	$^2\text{H}$ -Gehalt nach dem Standard (Standard ist gleich 1)
1	2	3
Stickstoffthermen		
10	Bohr. Usch-Beldir-10; 1/VII-66	0,94
6	Tarys (Quelle —6); 15/IX-66	0,93
21	Bohr. Nilowa Pustyn-5; VIII-65	0,98
5	Tschulakysy; 13/VII-67	0,85
48	Kotelnikowski; 13/VIII-66	0,91
49	Chakusy; 15/VIII-66	0,95
38	Smiiny; 18/VIII-66	0,96
Kohlendioxyd-Stickstoffthermen und Stickstoff-Kohlendioxydthermen		
14	Kishi-Chem; 26/VII-66	0,95
17	Dargal; 25/VIII-67	0,95
Kohlendioxydthermen		
16	Tschoigan (Quelle-12); 24/VIII-67	0,96
22	Bohr. Arshan-Tunkinski-26; 9/IX-67	0,88
Methanthermen		
23	Bohr. Tunka-1; 9/IX-67	0,95
Wässer der Speisungsgebiete		
—	Niederschläge am Baikalsee	1,01
—	Baikalsee	0,95
—	Fluß Jenissei bei Kysyl	0,93
—	Bach Arshanez an der Quelle Tarys	0,92
—	Bohrung am Ausfluß der Angara (Tiefe 295 m)	0,95
—	Quelle in der Nähe von der Stadt Tschadan	0,95

Wasser des Baikalsees beträgt die Deuteriumkonzentration durchschnittlich 0,95. Nach den Angaben zahlreicher Analysen (W. N. SOIFER und andere, 1967; D. E. WHITE, 1968 und andere) erreicht die Deuteriumkonzentration im Wasser der flüssigen Einschaltungen magmatischer Neubildungen und Fumarolen der Vulkane, die den Gehalt der Magmatogenwässer („juveniler“ Wässer) widerspiegeln, mehr als 1,0 (in bezug auf den Standard). In diesem Zusammenhang zeugt der Isotopenbestand des Wasserstoffes in den Thermalwässern Südsibiriens von der Genese der Hauptmasse der Thermalwässer durch Infiltration der Oberflächenwässer, und der Anteil von Wässern anderer Genese kann nur sehr gering sein.

Auch der Isotopenbestand des Sauerstoffs, der vom Kandidaten der Wissenschaften V. E. WETSTEIN (Kiew) in den von uns entnommenen Proben gemessen wurde, weist auf die dominierende Rolle der Infiltra-

tionsspeisung der Thermen hin. Bei der Untersuchung des Isotopenbestandes des Sauerstoffs wurde als Standard das Wasser des Flusses Dnjepr angenommen, in dem der  $^{18}\text{O}$ -Gehalt dem Null verhältnismäßig gleich ist. Der  $^{18}\text{O}$ -Gehalt im Thermalwasser der Bohrung Ushcheldir-10 und der Quelle Tarys ist gleich  $-0,96$  und  $-1,06\%$  in bezug auf den Standard. Ein Vergleich mit dem Gehalt des schweren Isotops von Sauerstoff im Wasser des Flusses Jenissei ( $-0,7\%$ ) und des Baikalsees ( $-0,72\%$ ), die von A. E. BABINEZ und V. E. WETSTEIN (1967) gemessen wurden, zeigt, daß sich der  $^{18}\text{O}$ -Gehalt in den Thermalwässern Südsibiriens in beträchtlich großen Bereichen bewegt, die für die Oberflächenwässer dieser Region charakteristisch sind. Wenn der Isotopenbestand nur auf Infiltrationswässer für die Bildung der Vorräte von Stickstoff-, Methan- und sogar Kohlensäurethermen hinweist, so wollen wir im folgenden untersuchen, was die Analyse ihres Gasbestands und ihrer chemischen Zusammensetzung zeigt.

Der Gasbestand der Stickstoffthermen nähert sich dem der atmosphärischen Luft, wovon das nahe Verhältnis von Argon zu Stickstoff in der Luft ( $\frac{A_r}{N_r} \cdot 100 = 1,18$ ) und in freien Gasen der Stickstoffthermen ( $\frac{A_r}{N_r} \cdot 100 = 0,99$  bis  $2,2$ ), und der Isotopenbestand der Edelgase in den letzteren zeugen. J. A. SCHTSCHUKOLJUKOW und I. N. TOLSTICHIN (1965), die den Isotopenbestand der Edelgase in den Thermalwässern Transbaikaliens erforscht haben, stellten in den Stickstoffthermen (Quellen Gorjatschinsk, Gusicha) nur das Vorhandensein von Luftargon fest.

Die Gas- und Mikrokomponentenzusammensetzung der Stickstoffthermen (das Vorherrschen der Sulfate oder Hydrokarbonate des Natriums, wobei Chloride untergeordnet vorkommen, und das Vorhandensein der Mikrokomponenten, die den Nebengesteinen eigen sind, wie Fluor, Lithium, Strontium, Bor usw.) zeugen auch davon, daß die Stickstoffthermen vorwiegend ein Ergebnis der Auslaugung durch Sickerwässer sind, die in große Tiefen eindringen (bis 3 bis 4 km). Ihre niedrige Mineralisierung wird durch eine verhältnismäßig geringe Auslaugungstätigkeit der Speisungswässer und „Indifferenz“ der Nebengesteine erklärt.

Viel komplizierter scheint die Genese der Kohlensäurethermen zu sein. Unter Beachtung der gesetzmäßigen räumlichen Verbindung von Herden des jungen Vulkanismus mit den Austrittsstellen der Kohlensäurethermen ist es schwer zu verneinen, daß die Kohlensäure teilweise bei den magmatischen Exhalationen entsteht. Aber man kann sie nicht nur als Produkt des Mantels betrachten. Bei erloschener vulkanischer Tätigkeit (A. M. OWTSCHINNIKOW, 1963; K. FRICKE, 1968) konnte die Kohlensäure in sehr großen Mengen beim Thermometamorphismus durch Hydrolyse und Dissoziation der Karbonate gebildet werden. Wenn man berücksichtigt, daß fast alle Kohlendioxidthermen Südsibiriens (mit Ausnahme des Gebietes des jungen Vulkanismus im Flußbecken von Einnach) mit den Karbonatgesteinen verbunden sind, so scheint uns die Meinung von der Ausscheidung der Kohlensäure vorwiegend im

Ergebnis der thermometamorphischen Prozesse am richtigsten zu sein. Darum, ohne eine gewisse Rolle der Endogenprozesse zu verneinen, wird angenommen, daß die Gasphase der Kohlensäurethermen höchstwahrscheinlich ein Produkt der Erdkruste postmagmatischen Ursprungs ist. Jedenfalls kann von diesem Standpunkt aus die Genese der kohlen-säurearmen Thermen (Choito-Gol, Dargal, Cholun-Ugun usw.) gut erklärt werden. Sie treten aus den Nichtkarbonatgesteinen aus, wo die Möglichkeiten für die thermometamorphische Kohlensäureansammlung ziemlich gering sind und rasch erschöpft werden. Den reichlichen Ablagerungen des Kalktuffs nach zu urteilen, brachten solche Quellen bis in die jüngste Vergangenheit viel mehr Kohlensäure aus. Anders gesagt, haben wir es hier mit den „Relikten“ der Kohlensäurethermen zu tun, wenn die  $\text{CO}_2$ -Ausscheidung aufhört oder die  $\text{CO}_2$ -Vorkommen erschöpft werden (V. G. ТКАТШУК, 1958).

Die Werte der Salz- und Mikrokomponentenzusammensetzung der Kohlensäurethermen zeugen einleuchtend von ihrer Entstehung infolge der Wechselwirkung mit den Nebengesteinen. Namentlich die Kohlensäure, deren Anreicherung in großen Tiefen vor sich geht, vermittelt eine intensive Auslaugung und Lösung der Nebengesteine durch die Thermalwässer (Tafel II). Deshalb weisen Kohlendioxydthermen eine viel größere Salzsättigung auf als Stickstoffthermen oder kohlen-säurearme Thermen. Oft werden vielgestaltige Prozesse der Metamorphisierung des Salzgehaltes der Wässer der Auslaugung folgen. So führt der Kationenaustausch dazu, daß sich Hydrokarbonat-Kalzium-Wässer in Hydrokarbonat-Natrium-Wässer verwandeln, andererseits wird bei der  $\text{CO}_2$ -Ausscheidung  $\text{SiO}_2$  von den Gesteinen absorbiert usw. Die Sättigung der Infiltrationswässer mit Kohlensäure kann in nicht großer Tiefe in den Bruchzonen verlaufen, die „trockene“ Kohlensäuregasstrahlen herausführen. In diesem Fall können die Wässer in dieser kurzen Frist nicht wärmer werden und durch Salze angereichert werden, und an die Oberfläche treten kalte Kohlensäurerlinge auf, deren Mineralisierung in der Regel niedriger ist als bei den Kohlensäurethermen.

Im Laufe der geologischen Zeiträume veränderten sich die Grenzen der Verbreitung der Kohlensäurethermen. Einerseits trat mit dem Eindringen der Infiltrationswässer und im Zusammenhang mit der Erschöpfung der Kohlensäurevorräte eine Tendenz der allmählichen Substitution der Kohlensäurewässer durch Stickstoffthermen von niedriger Mineralisierung hervor. Die Übergangsthermen werden dort gebildet, wo es keine typischen Karbonatgesteine gibt und damit bedeutende Kohlensäurevorräte fehlen. Andererseits erscheinen infolge der Veränderung der Wege und Tiefe des Eindringens von Infiltrationswässern, was öfters das Resultat der gegenwärtigen tektonischen Bewegungen ist, neben den Austrittsorten von Kohlensäurethermen kalte Kohlendioxydwässer und „trockene“ Kohlensäuregasstrahlen (als Beispiel des letzteren gilt die Quellengruppe von Tschoigan).

Schließlich ist zur Genese der Methanthermen, die in der Nachbarschaft von Herden des känozoischen Vulkanismus und über seine Grenzen hinaus verbreitet sind, zu sagen, daß sie immer von an organischen Substanzen reichen Ablagerungen begleitet sind. Die Gasphase der Methanthermen ist augenscheinlich organischen Ursprungs. Die Herkunft von Kohlenwasserstoffgasen muß man wahrscheinlich mit den biochemischen Prozessen der Zersetzung organischer Stoffe verbinden, die in den Nebengesteinen vorhanden sind. Auf Grund des spezifischen Salzbestandes der Methanthermen muß man annehmen, daß er als Ergebnis der komplizierten Umgestaltungen gebildet wird. Und die Stickstoffthermen der umgebenden Bergmassive haben in gewissem Maße die Zusammensetzung der Methanthermen beeinflußt: Im Ergebnis der Wechselwirkung der ersteren mit organischen Substanzen und infolge der Sulfatreduktion wandeln sich Sulfat-Natrium-Wässer in Hydrokarbonat-Natrium-Wässer um, und der Gasgehalt wird durch Schwefelwasserstoff angereichert (Tafel III).

Fraglich ist, wie das Chlor in die Methanthermen kommt. Einige Forscher meinen, daß das Chlor den aus den Magmaherden aufsteigenden hydrothermalen Lösungen entstammt. Aber diese Meinung wurde bisher nicht bestätigt. Wahrscheinlicher ist, daß folgende Quellen der Anreicherung des Chlors in Frage kommen: Erstens Migration mit den Porenwässern, die unter hydrostatischem Druck aus den Sedimentfolgen interalpiner Senken ausgepreßt werden, und zweitens Auslaugung von Salzspuren aus den Nebengesteinen durch Sickerwässer oder Stickstoffthermen, die in Senken entlastet werden. Den geochemischen Koeffizienten der Methanthermen  $\frac{r_{Na}}{r_{Cl}} > 0,8$  und  $\frac{Cl}{Br} > 300$  nach zu urteilen, kann das Erscheinen von Chlor, Brom, Kalium und anderer Mikrokomponenten in erster Linie durch Auslaugungstätigkeit der Infiltrationswässer, die in tiefere Schichten der Senken eingedrungen sind, erklärt werden.

Wir sehen, daß komplizierte und strittige Fragen der Genese der Thermen bis jetzt nicht eindeutig geklärt werden konnten. Ungeachtet dessen unterliegt es aber keinem Zweifel, daß die Hauptmasse der Thermalwasservorräte in den Berggebieten Südsibiriens Infiltrationswässer sind. Der Anteil „juveniler“ Wässer und Wässer anderer Genese ist sicher ziemlich gering und kann bei den heutigen Untersuchungen nicht berücksichtigt werden, obwohl eine Beimengung möglich ist.

### Zusammenfassung

In den Berggebieten Südsibiriens sind Thermalwässer besonders weit verbreitet. Sie treten in den Zonen der tektonischen Störungen auf oder sind in den tiefen Schichten der den Gebirgen zwischengeschalteten Senken anzutreffen. Auch intensive neotektonische Prozesse und der junge Vulkanismus verursachen das Auftreten von Thermalwässern. Nach dem in diesen Wässern dominierenden Gasbestand unterscheidet man Stickstoff-, Kohlendioxid- und Methanthermen.

Die Stickstoffthermen sind durch geringeren Gasgehalt und niedrige Mineralisation (in der Regel 0,2 bis 1,1 g/l) bei Temperaturen bis 84° C gekennzeichnet. In diesen Wässern herrschen Sulfate oder Hydrokarbonate des Natriums vor. Sie enthalten  $H_2SiO_3$  (30 bis 180 mg/l), Fluorid (bis 20 bis 28 mg/l), Strontium, Schwefelwasserstoff, Lithium und andere Komponenten.

Die Mineralisation der Kohlendioxydthermen ist viel höher (1,2 bis 5,5 g/l). Die Temperatur schwankt von 20 bis 44° C, der Kohlensäuregehalt ist stellenweise mehr als 2000 mg/l. Viele Kohlensäurethermen enthalten Radon (4 bis 10 m $\mu$  C/l). Nach der Zusammensetzung können sie meist den Hydrokarbonat-Kalzium- und manchmal Natriumwässern zugerechnet werden. Die Kohlensäurethermen sind durch ihre Armut an Fluor gekennzeichnet, und sie enthalten im Vergleich zu den Stickstoffthermen verhältnismäßig viel Schwefelwasserstoff, Kalium und Brom.

Die in den interalpinen Senken angetroffenen Methanthermen haben einen Salzgehalt bis zu 3,5 g/l. Ihre Temperatur in den tiefen Schichten (2700 bis 3000 m) erreicht 100° C. Nach der Zusammensetzung sind sie Hydrokarbonat- oder Chlorid-Natrium-Thermen und enthalten sehr wenig Sulfate.

In der Abhandlung werden auch die geochemischen Aspekte der Genese der Thermen unter Anwendung der Isotopenanalyse betrachtet. Auf Grund der vorhandenen Informationen ergab sich die Schlußfolgerung, daß die Thermalwasservorräte hauptsächlich Infiltrationswässern entstammen. Der Anteil der Wässer anderen Ursprungs ist gering und kann gegenwärtig nicht berücksichtigt werden.

## Literatur

- BABINEZ, A. E. & W. E. WETSTEIN: Über die Ergebnisse der Erforschung des  $^{18}O$ -Gehaltes in einigen genetischen Abarten der Naturwässer. Isd-wo „Naukova Dunka“, Kiew 1967. (In russischer Sprache.)
- BASKOW, E. A. & C. I. KLIMOW: Die Zusammensetzung und Bildungsverhältnisse der Mineralwässer von Transbaikalien. Tr. VSEGEI, tom 101, Leningrad 1963. (In russischer Sprache.)
- FRICKE, K.: Zur Entstehung von  $CO_2$ -Gas-Lagerstätten. Report of the XXIII Session IGC, N 17-“Genesis of Mineral and Thermal Waters”. Prague 1968.
- KRASINZEWA, W. W.: Chemische Zusammensetzung der wichtigsten Thermalquellen in der Burjat-Mongolei. Sammelband „Fragen der Erforschung von den Kurortnaturschätzen der UdSSR“. Medgis, Moskau 1955. (In russischer Sprache.)
- LOMONOSSOW, I. S. & S. V. LYSAK: Thermal waters of Siberian Platform and its folded-mountains framing. International Geology Review, vol. 10, No. 1, Washington 1968.
- LOMONOSSOW, I. S.: Die Thermen der Baikalfurche (Gesetzmäßigkeiten der Verbreitung und Bildung). Sammelband „Genese der Mineral- und Thermalwässer. Internationaler geol. Kongreß, XXIII. Session. Vorträge der sowjetischen Geologen“. Isd-wo „Nauka“, Moskau 1963. (In russischer Sprache.)

- OWTSCHINNIKOW, A. M.: Mineralwässer (Die Lehre von den Lagerstätten der Mineralwässer mit Rücksicht auf Hydrogeochemie und Radiohydrogeologie). Gosgeoltechisdat, Moskau 1963. (In russischer Sprache.)
- ORLOWA, L. M.: Die Thermen des Gebietes Tschita. Isw. Zab. fil. geogr. o-wa SSSR, tom 2, wyp. 3, 1966. (In russischer Sprache.)
- PINNEKER, E. V.: Die Mineralwässer von Tuwa. Kysyl 1968. (In russischer Sprache.)
- PINNEKER, E. V., B. I. PISSARSKI, I. S. LOMONOSSOW, R. J. KOLDYSCHewa, A. M. DIDENKO & S. I. SCHERMAN: Die Hydrogeologie des Baikargebietes. Isd-wo „Nauka“, Moskau 1968. (In russischer Sprache.)
- SCHUKOLJUKOW, I. A. & I. N. TOLSTICHIN: Xenon-, Argon- und Heliumgehalt in einigen Naturgasen. Shur. „Geochimija“, N 7, 1965. (In russischer Sprache.)
- SOIFER, W. N., W. S. BREZGUNOW & L. S. VLASOWA: Die Rolle der stabilen Isotope des Wasserstoffes bei der Untersuchung der geologischen Prozesse. Shur. „Geochimija“, N 5, 1967. (In russischer Sprache.)
- SUESS, E.: Über heiße Quellen. Naturwiss. Rundsch. XVII, NN 46—48, 1902.
- TKATSCHUK, V. G.: Von den Thermentypen des Sajan—Baikal-Berggebietes. Dokl. AN SSSR, tom 118, N 6, 1958. (In russischer Sprache.)
- WHITE, D. E.: Hydrology, Activity and Heat Flow of the Streamboat Springs Thermal System, Washoe, Country Nevada. Washington 1968.
- Mineralwässer im Süden Ostsibiriens, Band I (Redaktion W. G. TKATSCHUK und N. I. TOLSTICHIN). Isd-wo AN SSSR, Moskau-Leningrad 1961. (In russischer Sprache.)

### Summary

There exists a great number of thermal waters in the area of Southern Siberia, concentrated in fault zones and in aquifers of the deep strata of the intramountainous basins, and created also by neotectonic processes and the young vulcanism.

With regard to the dominating gas content we distinguish nitrogenous, carbon dioxide and methane thermal waters.

The **nitrogenous thermal waters** show a low gas content and a low mineralisation (in general 0.2—1.1 g/l) but temperatures up to 84° C. Sulfate or sodium hydrocarbonate dominate. There is also a content of  $H_2SiO_3$  (30—180 mg/l), fluoride (20—28 mg/l), strontium,  $H_2S$ , lithium etc.

The mineralisation of the **carbon dioxide thermal waters** is much higher (1.2—5.5 g/l). The temperature lies between 20 to 44° C, the content of  $CO_2$  is sometimes higher than 2000 mg/l. Many of these thermal waters contain also radium emanation (4—10 m  $\mu$ Cl). Typical of the carbon dioxide thermal waters is their lack of fluor but they are rich in  $H_2S$ , K and Br.

The **methane thermal waters** in the intramountainous basins have salt contents up to 3.5 g/l. The temperature in the lower strata in a depth of 2700—3000 m reaches 100° C. They are hydrocarbonate or chloride-sodium thermal waters and are poor in sulfate.

The report also gives the results of isotope analyses concerning the genesis of the thermal waters. It seems that nearly all the thermal waters originate from infiltration water.

Anschrift der Verfasser:

T. S. LOMONOSSOW und E. V. PINNEKER

Institut für die Erforschung der Erdkruste in Ostsibirien,  
Favorskiistraße 1, Irkutsk 33, UdSSR

Tabelle 1: Zusammensetzung von spontanen und gelösten Gasen der Thermalwässer

Nr. auf der Karte	Name der Quelle oder der Bohrung; Datum der Probenentnahme	Gasart	Gas-sättigung mg/l	H <sub>2</sub> S + CO <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> + schwere Kohlenwasserstoffe %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> Edelgase %	einschließend		Autor
									Ar+Kr+Xe %	He+Ne %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Altai-West-Sajaner Gebiet											
Stickstoffthermen											
1	Belokuricha; 1956	spontan	—	—	—	—	—	100	—	—	W. W. IWANOW
4	Abakan; VIII-1960	"	—	2,3	0	0	0	97,7	1,352	0,32	M. A. WOLKOWA
Ost-Sajaner Gebiet											
Stickstoffthermen											
5	Tschulaksy; 12/VII-67	gelöst	34	6,30	15,0	0	—	78,70	0,922	<0,002	E. V. PINNEKER
21	Nilowa Pustyn (Quelle-1); 6/VI-67	"	—	1,0	7,5	0	0	91,5	1,542	0,045	I. S. LOMONOSSOW
Kohlendioxydthermen											
16	Tschoigan (Quelle 13); 24/VII-67	spontan	—	95,84	0,77	—	—	3,39	0,085	<0,002	E. V. PINNEKER
20	Schumak (Quelle 98); 1965	gelöst	73	91,5	1,05	0	0	7,45	—	—	I. M. BORISENKO
22	Bohr. Arschan-Tunkinski-26; 9/IX-67	spontan	—	92,38	1,67	0	0	5,95	—	—	"
Kohlendioxyd-Stickstoff- und Stickstoff-Kohlendioxydthermen (kohlendioxydarne Thermen)											
14	Kishi-Chem; 26/VII-66	spontan	—	21,3	8,9	0	0,01	70,6	—	—	E. V. PINNEKER
18	Choito-Gol; 30/VII-55	gelöst	59	36,69	7,95	0	0	52,36	—	—	W. G. TRATSCHUK
19	Cholun-Ugun; 1/VII-55	"	68,0	48,8	6,24	0	0	43,96	—	—	"
Baikalgebiet											
Stickstoffthermen											
7	Tere-Chol; 20/VIII-66	spontan	—	0,60	7,80	1,90	—	89,7	—	—	E. V. PINNEKER
12	Maimalysch; 11/VII-66	"	—	0	0	0	0	100	—	—	"
10	Usch-Beldir (Quelle 2); 1964	"	—	8,0	8,0	0,37	0,006	83,62	1,42	0,378	L. N. BARABANOW
6	Tarys (Quelle 6); 14/IX-66	gelöst	22,2	4,8	2,80	0,09	0	92,31	—	0	E. V. PINNEKER
24	Engorboi; 30/VII-63	"	20	2,5	0,4	0,4	0	96,7	1,9519	0,1637	I. S. LOMONOSSOW
38	Smiiny; 30/IX-63	"	28	0,2	20,5	0,2	0	79,1	0,9118	0,0092	"
43	Garga; 18/VII-63	"	—	2,0	8,4	0,8	0,2	88,5	1,8184	0,250	"
44	Alla; 17/VII-63	"	—	0,1	5,2	0,5	0,6	93,6	1,9230	0,0499	"
45	Kutschechir; 14/VII-63	"	25	0,6	4,0	0,4	0	95,0	1,5566	0,039	"
48	Kotelnikowski; 26/VII-63	"	33	0,9	17,0	0,6	0	81,5	1,7639	0,0170	"
49	Chakusy; 13/IX-63	"	—	0	7,4	0	0	92,6	1,0089	0,0616	"
51	Korikei; 31/VIII-63	"	22	1,1	5,3	0	0	93,4	1,7639	0,0170	"
52	Dselinda; 30/VIII-63	"	—	0,7	13,3	0,1	0	85,9	1,6937	0,0305	"
30	Bohr. Pitatelewo-52; 1/VIII-63	"	—	0,6	11,3	2,4	0	85,7	1,4008	0,1551	"
57	Baunt; 1955	spontan	—	0	0	0	—	100	1,4468	0,2678	W. A.
58	Busani; 1955	"	—	0	0,2	14,7	—	85,1	1,486	0,45	ALBAGATSCHIEWA
60	Mogoi; 1955	"	—	0	0,80	2,90	—	96,30	1,4914	0,2113	"
59	Schurinda; 1955	"	—	0,60	0,10	0	—	99,30	1,4542	0,4263	"
46	Sejuiski; 16/VII-63	gelöst	20	0,2	1,2	0	—	98,6	—	—	I. S. LOMONOSSOW
33	Gusicha; 21/VII-63	"	22	0,51	0,25	0	—	99,24	—	—	"
37	Ina; 1953	"	—	0,45	0	0	—	99,55	1,12	0,51	OWTSCHINNIKOW
64	Purelag; 1964	spontan	—	0,8	4,8	0	0	94,4	1,246	0,125	G. I. KLIMOW
68	Olekma; 7/VII-64	gelöst	—	0,1	0,5	0,7	—	98,7	0,9703	0,0075	R. S. KONONOWA
Methanthermen											
23	Bohr. Tunka-1; 1957	gelöst	—	—	0,9	84,2	0	14,0	—	—	W. G. TRATSCHUK
	" 9/IX-67	spontan	—	1,4	1,2	80,0	0	17,4	—	—	B. I. PISSARSKI
29	Bohr. Suchaja-1; 27/VII-63	gelöst	—	11,3	0,9	73,51	0,29	14,88	0,3217	0,036	I. S. LOMONOSSOW
26	Bohr. Istok-1; 1962	spontan	—	0	0	53,0	0	47,0	—	—	W. W. SAMSONOW
27	Bohr. Istok-3; XII-62	"	—	4,56	1,75	87,63	—	6,06	—	—	"
Daurer Gebiet											
Stickstoffthermen											
69	Semiosjerski; 1965	spontan	—	0,45	0	0,22	0	99,33	—	—	L. M. ORLOWA
72	Werchneingodinski; 1932	"	—	0	0,4	0	0	99,6	—	—	I. P. DENGIN
75	Bylyra; 1965	"	—	1,0	0,3	0	0	98,7	1,44	—	L. M. ORLOWA
76	Ulura; 1965	"	—	1,36	0	0	0	98,64	1,41	—	"
Kohlendioxyd-Stickstoffthermen											
79	Jamkun; 1953	spontan	—	21,4	0	1,6	0	77	0,8	1,158	"

Nummer auf der Karte	Name der Quelle oder der Bohrung; Datum der Probenentnahme.	Alter der wasser- haltigen Gesteine	Wasser- temperatur, °C pH	Form der Analyse	Kationen					Anionen							Minerali- sation mg/l	H <sub>2</sub> S, mg/l	CO <sub>2</sub> , mg/l	R <sub>n</sub> , mnc/l	H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , mg/l	Autor
					NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Σ Fe	Fe <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>						
					6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17						
6	Tarys (Quelle-6); 14/IX-66	Pt-Pz	45,5 > 8,4	mg/l mval- mval-%	Spuren	4,60 0,118 1,65	158,7 6,90 96,33	0	2,91 0,145 2,02	0	12,8 0,674 9,41	8,76 0,25 3,48	0	241,9 5,04 70,35	24,0 0,8 11,17	24,0 0,40 5,59	573,1	11,7	0	0,2	95	E. V. PINNEKER, J. I. KUSTOW
21	Nilowa Pustyn (Quelle-1); 6/VI-63	Pt <sub>3</sub>	41,0 8,5	mg/l mval- mval-%	—	8,33 0,213 1,50	246,3 10,708 75,62	3,28 0,27 1,91	59,52 2,97 20,97	0	8,0 0,242 2,97	24,82 0,70 4,95	—	568,6 11,84 83,6	0	109,8 1,20 8,48	1105,3	0,5	4,0	4,0	76,7	
24	Engorboi; 30/VII-62	Pt	37 7	mg/l mval- mval-%	0	8,05 0,206 1,56	265,0 11,52 86,21	2,299 0,189 1,43	25,16 1,255 10,80	0	—	57,69 1,628 12,36	—	441,5 9,192 69,79	12,0 0,40 3,04	118,9 1,95 14,81	1004,4	—	—	0,8	73,5	I. S. LOMONOSOW, N. W. JSNITSKAJA
30	Bohrung Pitalewo-52 (Tiefe 230—280 m); 1/VIII-63	Pt <sub>3</sub>	74,8 8,0	mg/l mval- mval-%	—	20,58 0,731 2,45	533,89 23,213 77,73	3,931 0,323 1,08	112,1 5,599 18,73	—	5,2 0,274 0,92	188,2 5,307 18,52	—	1135 23,63 78,38	—	39,65 0,65 2,18	2043,5	—	—	0,8	73,5	
31	Gorjatschinsk (Hauptquelle); 23/VII-63	A	54 7,6	mg/l mval- mval-%	0,4 0,22	4,725 0,121 1,53	141,4 6,148 77,51	2,293 0,189 2,38	29,11 1,452 18,36	—	2,6 0,13 —	13,57 0,383 4,84	—	318,3 6,627 83,78	—	54,9 0,90 11,30	650,2	2,0	—	1,8	83	I. S. LOMONOSOW, N. M. KOPYLOWA
33	Gusicha; 22/IV-66	A	55 7,2	mg/l mval- mval-%	—	17,94 0,459 4,91	180,2 7,836 83,74	1,529 0,126 1,35	18,76 0,936 10,0	0	12,0 0,632 6,76	36,17 1,02 10,90	0,261 0,003	286,0 5,955 63,64	0	106,8 1,75 18,70	750,9	6,0	—	1,5	91,31	I. S. LOMONOSOW, N. M. KOPYLOWA
35	Alga; 1962	Pt <sub>3</sub>	20,8 7,0	mg/l mval- mval-%	0	125,0 4,732 67,48	1,0 0,082 1,14	44,0 2,20 31,38	—	—	1,60 0,08 1,0	20,0 0,56 7,10	—	308,0 6,41 82,90	0	43,0 0,70 9,00	593,6	—	—	1,5	51,0	E. A. BASKOW, G. I. KLIMOW
37	Ina; 1962	Pt <sub>3</sub>	20 7,1	mg/l mval- mval-%	0	263,0 11,32 88,40	1,0 —	30,0 1,50 11,60	—	—	4,0 0,21 1,62	37,0 1,04 8,10	—	504,0 10,50 81,00	73,0 1,20 9,27	—	968	—	—	—	55	
39	Bystrinski; 17/V-66	A-Pt	22	mg/l mval- mval-%	0,1	3,333 0,085 0,90	200,0 8,698 92,59	1,42 0,117 1,25	9,90 0,494 5,26	0	14,0 0,737 7,84	64,49 1,819 19,36	0,457 0,006	249,2 5,189 55,23	6,00 2,13	38,45 1,45 15,44	693,5	—	—	—	56	
40	Dawscha; 14/X-66	A	45 7,2	mg/l mval- mval-%	0	6,245 0,16 2,26	141,3 6,143 86,7	0,655 0,054 0,76	14,59 0,728 10,28	0	14,0 0,737 10,40	36,17 1,02 14,40	0,392 0,005	195,9 4,078 57,56	15,0 0,50 7,06	45,75 0,75 10,58	509,7	—	—	—	39,7	I. S. LOMONOSOW, N. M. KOPYLOWA
43	Garga; 15/IV-66	Pt	76 7,6	mg/l mval- mval-%	0	18,29 0,468 3,28	284,5 12,37 86,62	1,092 0,09 0,63	27,09 1,352 9,47	0	12,0 0,632 4,43	56,06 1,58 11,06	0,261 0,003	490,9 10,22 71,55	0	112,9 1,85 12,96	1079,4	12	—	4,3	76,3	
49	Chakusy; 13/IX-63	Pt	46 7,4	mg/l mval- mval-%	0	4,35 0,111 2,68	64,10 2,787 67,27	1,856 0,153 3,69	21,88 1,092 26,36	0	4,80 0,253 6,41	7,234 0,204 5,17	0,326 0,004 0,10	136,2 2,836 71,85	—	39,65 0,65 16,47	308,1	—	—	—	27,7	I. S. LOMONOSOW, N. W. JSNITSKAJA
53	Irkana; 12/VIII-65	A-Pt	34,8 7,8	mg/l mval- mval-%	—	2,13 0,055 0,72	142,1 6,176 79,81	1,75 0,144 1,87	27,05 1,35 17,60	—	10,6 0,558 7,29	28,64 0,807 10,52	—	245,2 5,105 66,55	—	73,20 1,20 15,64	555,7	—	—	3,6	25	E. V. PINNEKER, N. W. JSNITSKAJA
64	Purelag; 9/VIII-66	Pt	41 8,0	mg/l mval- mval-%	0,2 0,011 0,19	4,258 0,109 1,84	132,3 5,75 96,88	0	1,08 0,054 0,90	0,3 0,011 0,19	2,8 0,147 2,48	32,0 0,902 15,20	0	167,5 3,487 58,74	12,0 0,40 6,74	61,0 1,0 16,84	540,5	—	0	—	127,1	B. I. PISSARSKI, W. I. KLUTSCHNIKOW
67	Werchnetscharki; 16/VI-63	Pt	50,5 8,1	mg/l mval- mval-%	—	150,2 65,350 93,30	0,20 0,0164 0,3	9,10 0,4541 6,40	—	—	5,00 0,263 3,60	69,30 1,9601 26,9	—	187,2 3,897 53,3	23,8 0,793 10,1	20,90 0,342 6,10	460,9	5,6	—	—	76,1	N. A. NEKRASSOW
1	Bohrung Belokuricha-4; VI-63		37 9,2	mg/l mval- mval-%	Spuren	1,2 0,03 0,82	79,8 3,47 94,29	0,3 0,02 0,54	3,2 0,16 4,35	—	7,5 0,39 10,60	17,3 0,49 13,31	Spuren	70,8 1,47 39,95	—	81,1 1,33 36,14	304,2	—	—	10	43	N. M. ELMANOWA
34	Uro; 2/VII-65	Pt <sub>3</sub>	47	mg/l mval- mval-%	—	2,37 0,06 0,98	126,1 5,486 89,23	3,06 0,25 5,69	7,01 0,35 5,69	—	12,0 0,63 10,26	17,90 0,505 8,21	—	149,4 3,11 50,63	12,0 0,40 6,55	91,50 1,50 24,40	525,1	—	—	—	103,8	A. A. DIDENKO, N. W. JSNITSKAJA
38	Sminy; 30/IX-63	Pt <sub>3</sub>	45,5 7,6	mg/l mval- mval-%	4,5 0,194 3,33	2,867 0,073 1,26	120,9 5,258 89,88	0,437 0,036 0,63	5,731 0,286 4,90	0	12,0 0,632 11,18	25,32 0,714 12,63	—	130,0 4,707 47,89	0	97,60 1,60 28,30	468,1	23	—	—	69	I. S. LOMONOSOW, N. W. JSNITSKAJA
41	Jasowka; 4/X-65	A	22,8 8,0	mg/l mval- mval-%	0	54,90 2,387 74,62	1,97 0,162 5,07	13,03 0,65 20,31	—	—	5,3 0,279 8,72	12,54 0,354 11,06	—	72,84 1,516 47,08	—	64,05 1,05 33,14	224,6	27,9	—	3,7	0	I. S. LOMONOSOW, N. M. KOPYLOWA
44	Alla; 13/IV-66	Pt <sub>3</sub>	74 7,8	mg/l mval- mval-%	6,0 0,332 5,72	6,277 0,161 2,75	109,90 4,77 82,64	1,201 0,10 1,71	6,336 0,416 7,18	0	14,0 0,737 13,52	18,09 0,51 9,35	0,114 0,001	108,4 2,257 41,38	12,0 0,40 7,33	94,56 1,55 28,42	376,1	24,8	—	0,6	81,2	I. S. LOMONOSOW, N. M. KOPYLOWA
51	Korikei; 31/VIII-63	Pt	42,5 7,2	mg/l mval- mval-%	0	4,025 0,103 2,53	77,03 8,349 82,31	1,256 0,103 2,53	10,31 0,514 12,63	—	—	14,19 0,40 9,83	—	113,8 2,369 58,22	—	79,30 1,30 31,95	324,1	3,4	—	1,5	24,25	I. S. LOMONOSOW, N. W. JSNITSKAJA
61	Muja; 14/VIII-65	Pt	35 7,3	mg/l mval- mval-%	0,10 0,01 0,13	7,22 0,185 2,41	114,0 4,95 64,85	3,28 0,27 3,51	44,59 2,225 29,10	0,3 0,02 0,26	8,0 0,421 5,48	10,38 0,293 3,81	—	239,9 4,995 25,49	0	119,6 1,96 25,49	604,2	0	0	—	56,8	I. S. LOMONOSOW, N. M. KOPYLOWA
68	Olekma; 25/III-64	Pt	48 7,8	mg/l mval- mval-%	0,1	78,90 3,43 74,90	0,66 0,06 1,30	21,80 1,09 23,80	—	—	—	74,47 2,10 45,80	—	80,0 1,67 36,50	12,0 0,41 9,0	24,40 0,40 8,70	528,3	—	0	—	54	R. S. KONONOWA
5	Tschulakys; 12/VII-67	D	16—22 7,8	mg/l mval- mval-%	0	1,28 0,03 0,66	68,08 2,96 64,62	6,99 0,57 12,45	20,4 1,02 22,27	0	1,2 0,06 1,31	42,41 1,47 26,20	1,3 0,02 0,44	70,8 1,47 32,09	36,0 1,20 26,20	24,0 0,63 13,76	350	—	0	0,12	77,6	E. V. PINNEKER, J. I. KUSTOW
10	Bohrung Usch-Beldir-10 (Tiefe 25—41 m); 8/VI-66	Pz	84 8,4	mg/l mval- mval-%	7,50 0,416 7,31	7,20 0,184 3,23	100,4 4,366 76,69	8,26 0,679 11,93	0,962 0,048 0,84	0	8,00 0,42 7,40	26,31 0,742 13,03	Spuren	83,10 1,73 30,38	72,02 2,40 42,16	4,40 0,40 7,93	421,3	17	0	3,0	83,2	E. V. PINNEKER
12	Maimalysch; 11/VIII-66	D	39 7,6	mg/l mval- mval-%	0	2,90 0,07 2,11	70,10 3,048 92,03	0	3,89 0,194 5,86	0	2,20 0,116 3,50	19,29 0,544 16,42	—	40,9 0,85 25,72	12,0 0,4 12,08	85,40 1,40 42,28	293,8	1,0	0	0,8	57,1	E. V. PINNEKER
36	Tolstichinski; 18/IV-66	Pt	27	mg/l mval- mval-%	0,1	4,55 0,116 1,78	136,1 5,917 90,82	1,747 0,144 2,21	6,774 0,388 5,19	0	8,0 0,42 6,46	25,32 0,714 10,96	0,163 0,002	123,9 2,58 36,60	48,0 1,60 24,56	73,2 1,20 18,42	435,7	—	—	—	7,9	I. S. LOMONOSOW, N. M. KOPYLOWA
42	Bolscheretschenski; 25/VI-65	Pt	74	mg/l mval- mval-%	—	3,06 0,078 1,44	111,2 4,837 89,45	2,84 0,234 4,33	4,84 0,224 4,14	—	11,7 0,616 11,39	8,16 0,23 4,25	—	96,7 2,013 37,22	42,0 1,4 25,88	70,15 1,15 21,16	466,4	13,8	—	—	115,7	A. P. SCHMOTOW, N. M. KOPYLOWA
45	Kutschechir; 14/VIII-63	Pt	40 7,8	mg/l mval- mval-%	6,0 0,332 5,17	4,40 0,113 1,76	127,9 5,56 86,74	0,546 0,045 0,70	7,294 0,361 5,63	—	14,0 0,737 12,12	21,70 0,612 10,06	0,261 0,003	95,26 1,983 32,60	39,0 1,30 21,38	88,5 1,45 23,84	467,0	29	—	0,4	62,2	I. S. LOMONOSOW, N. W. JSNITSKAJA
46	Sejuiski; 20/IV-66	Pt	52 7,8	mg/l mval- mval-%	1,5 0,083 1,75	2,75 0,07 1,48	96,28 4,186 89,57	0	6,774 0,338 7,20	0	16,0 0,842 18,33	18,09 0,51 11,10	0,457 0,006	66,87 1,392 30,30	0	112,9 1,85 40,27	376,2	—	—	0,3	56,8	
47	Umchei; 12/V-66	Pt	46 7,6	mg/l mval- mval-%	3,0 0,166 2,74	3,125 0,08 1,33	123,8 5,384 87,68	2,293 0,19 3,13	6,252 0,312 5,12	0	14,0 0,737 12,35	14,47 0,408 6,84	0,261 0,003	104,3 2,17 36,39	51,0 1,70 28,49	57,95 0,95 15,93	448,3	31	—	0,4	70,8	I. S. LOMONOSOW, N. M. KOPYLOWA
55	Mujakan; 5/VIII-65	Pt	40—57	mg/l mval- mval-%	—	1,77 0,045 1,10	58,81 2,551 64,19	2,40 0,197 4,87	24,05 1,90 29,83	—	20,0 1,053 26,31	10,74 0,303 7,49	—	49,79 1,037 25,65	0	100,7 1,65 40,54	321,0	—	—	—	52,8	I. S