

## Der Frostkarst – seine Besonderheiten und Zusammenwirkung mit Grundwässern

*“Frostkarst” – its Characteristics and Interaction with Groundwater*

E. V. PINNEKER<sup>1)</sup>

### Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	160
2. Besonderheiten des Frostkarstes.....	160
3. Methoden und Ergebnisse der Untersuchung der Wasser-Frostkarst- Wechselwirkung.....	163
4. Die Eiskarstvorkommen.....	166
Zusammenfassung.....	169
Literatur.....	170
Summary.....	171

<sup>1)</sup> Prof. Dr. E. V. PINNEKER, Institut zur Erforschung der Erdkruste, Sibirische Akademie der Wissenschaften, Lemontow-Str. 128, 664033 Irkutsk.

## 1. Einleitung

Untersuchungen des „Frostkarstes“, d. h. des in der Permafrostzone entwickelten Karstes, begannen in Ostsibirien – wie in der ganzen Welt – relativ spät. Einige Forscher standen dem Thema skeptisch gegenüber, in der Annahme, daß Permafrost die Karstbildung verhindere. Nach ersten ausführlichen Untersuchungen ist man von dieser Meinung abgegangen. Karstphänomene in der Ewigen Gefrornis erwiesen sich als weitverbreitet; dabei sind verschiedene Karstarten (z. B. Karbonat-, Sulfat-, Salz- und vor allem Eiskarst) zu beobachten.

Einer der ersten, die Frostkarst-Anzeichen schon Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckten, war Permafrost-Forscher A. F. MIDDENDORF (1861). A. W. LWOW (1916) hat die in diesem Territorium befindlichen Karstwässer und Quellen in seiner der Prospektion der Wasserversorgungsquellen unter Permafrostverhältnissen gewidmeten Monographie beschrieben. Den ersten eigens dem Frostkarst gewidmeten Bericht hat S. S. KORSHUJEW (1967) geschrieben. Probleme des Zusammenwirkens von Grundwasser und Karst wurden in Arbeiten von D. S. SOKOLOW (1962), N. W. RODIONOW (1972), S. E. SUCHODOLSKI (1982) und A. G. PHILIPPOW (1984) beleuchtet. Alle diese Forscher sind der Ansicht, daß Permafrost die Karstbildungsprozesse nicht eliminiert, sondern nur verzögert.

Die Schale von gefrorenen Gesteinen schafft Sonderbedingungen für die Karstentwicklung. Die die Karstbildung begünstigenden und die diesen Prozeß verzögernden Faktoren wirken gegeneinander. Der Karst entwickelt sich unter diesen Umständen verschiedenartig und mit verschiedener Intensivität. Infolgedessen hat der Frostkarst die ihm eigenen Besonderheiten, die ihn vom Karst der aufgetauten Gesteine unterscheiden.

## 2. Besonderheiten des Frostkarstes

Eine der speziellen Besonderheiten des Frostkarstes, eines ausschließlich post-humem Karstes, besteht darin, daß er sich bei Minustemperaturen entwickelt. Die Eigenartigkeit des Karstbildungsverlaufes im Gebiet der Ewigen Gefrornis, wie A. G. PHILIPPOW (1984) berichtet, zeigt sich im herdartigen und sporadischen Vorkommen. Wie ist die Beschaffenheit dieser Lokalisierung?

Sie hängt von geologischen, klimatischen, hydrographischen und sonstigen Bedingungen ab. So begünstigen geologische Umstände wie Antiklinalstrukturen, Klüftung und Vorhandensein von Bruchzonen, Schichtfugen der karstbildenden Gesteine usw. die Karstentwicklung. In den Bruchzonen wird der Grundwasserabfluß durch die Ewige Gefrornis lokalisiert. Die Bereiche einer intensiven Oberflächenklüftung stellen üblicherweise Wasserspeicherungsgebiete dar, während die Hangfußlagen als Austrittspunkte für Karstwässer dienen; im Falle des Karbonat- oder Sulfatkarstes zeichnen sich diese Bereiche in ewig gefrorenen Karstmassiven durch die stärkste Verkarstung aus. Dagegen tragen einige Klimabedingungen (z. B. niedrige Jahresmittel der Negativtemperaturen oder tiefes Durchfrieren der Gesteine) nicht zur Karstbildung bei, sie hemmen die Grundwasserspeisung und -austritte. In der unterbrochenen Frostzone an Südhängen ist der Karst weniger behindert als in nordseitigen Lagen. Ungeachtet der Verschiedenartigkeit der Einwirkung der

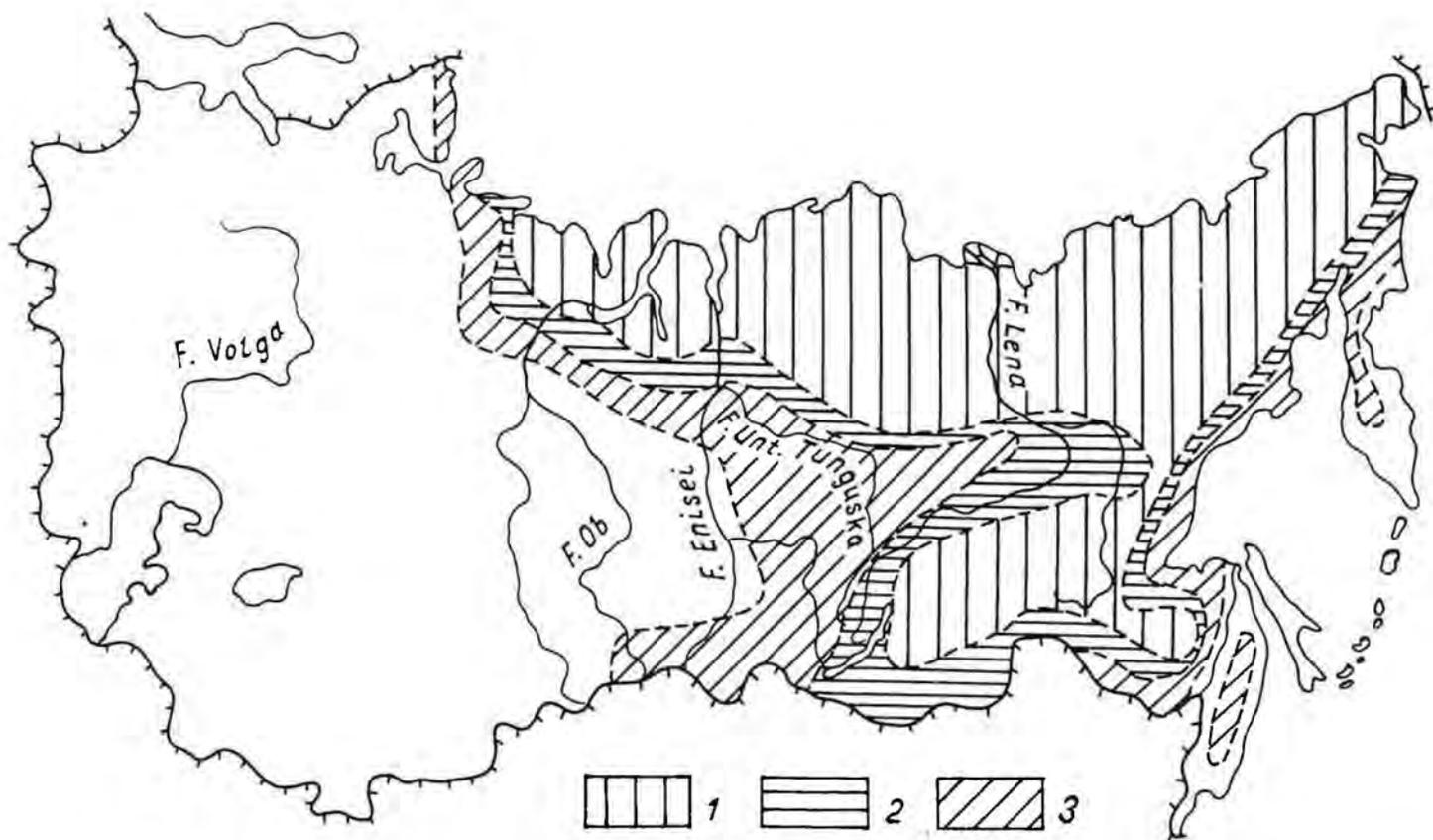


Fig. 1: Kartenskizze der ewig gefrorenen Zone der UdSSR (nach I. A. NEKRASOW). 1 – Zone der geschlossenen Gefromis; 2 – Zone der ununterbrochenen Gefromis; 3 – Zone der inselhaften Gefromis.

Naturfaktoren ist der Karst nicht nur in Gebieten der inselhaften oder unterbrochenen, sondern auch der geschlossenen Gefrornis zu beobachten (Fig. 1).

Ansichten über die Rolle sowie die Einwirkung der Gefrornis auf die Karstentwicklung sind verschieden. Laut der weitverbreiteten Auffassung (S. S. SOKOLOV, 1962; A. G. PHILIPPOV, 1984) kennt man Karsterscheinungen in Karbonat- und Sulfatgesteinen vorzugsweise in:

1. saisonaufgetauten Schichten;
2. Auftauböden (in Russisch sogenannten Taliken) und Territorien mit Gefrornisinseln;
3. in den Sohlen von geschlossenen Permafrostböden, wo Grundwasser vorwiegend als Salzlösungen bekannt sind.

Gemäß anderer Ansicht (S. S. KORSHUJEW, 1967) spielt sich die Karstbildung gegenwärtig unmittelbar in gefrorenen Karstgesteinen ab. Die Forschungen von I. A. Tjutjunow (1961) haben gezeigt, daß dieser chemisch-physikalische Prozeß der Gesteinsumwandlung vorwiegend unter der Einwirkung der an der Mineraloberfläche adsorbierenden und sogar bei negativen Temperaturen nicht frierenden dünnen Wasserhäuten abläuft.

Unserer Meinung nach sind beide Auffassungen möglich: beide Arten des Karstvorkommens sind im Permafrostgebiet zu beobachten. Freilich ist der Karst am deutlichsten in den Talik-Zonen entwickelt, wo der Grundwasserabfluß dank dieser Erscheinungen intensiviert wird und dies zu den durch die der Gefrornis zwischengeschalteten Wasser bedingte Aufeiserscheinungen führen kann (Fig. 2). Ebenso deutlich ist der über dem Permafrostkörper liegende Karst der saisonaufgetauten Schicht zu beobachten, der als Einsturztrichter, Höhlen usw. zutage tritt. Als Beispiel solcher Karstformen können die Ojusut-Höhlen (im Gebiet des Mittellaufs des

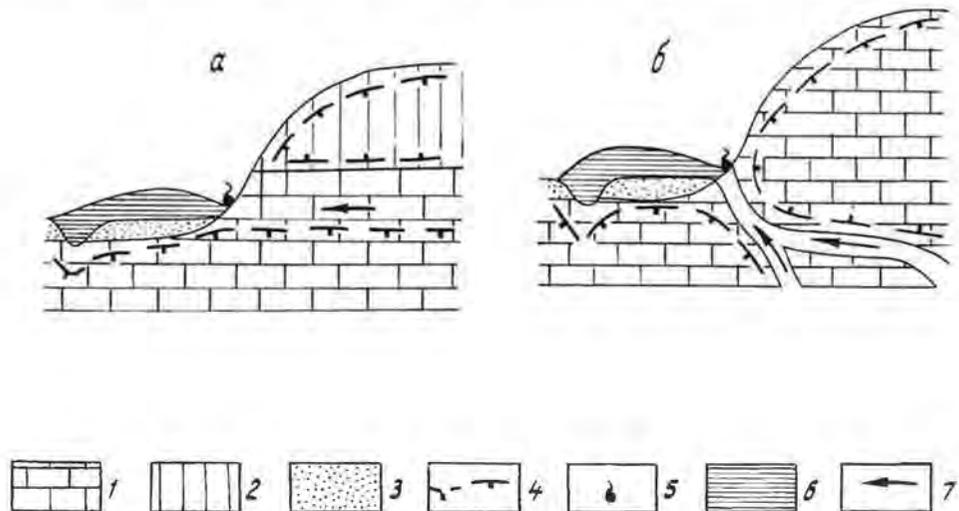


Fig. 2: Aufeis von der Gefrornis zwischengelagerter Wasser. Arten des Karstwassers: a – Schichtkarstwasser; b – kluftgängige Wasser. 1 – Karbonatgesteine; 2 – Tone; 3 – Lockerablagerungen; 4 – Grenze der mehrjährig gefrorenen Gesteine; 5 – Karstwasseraustritt; 6 – Aufeis; 7 – Richtung der Karstwasserbewegung.

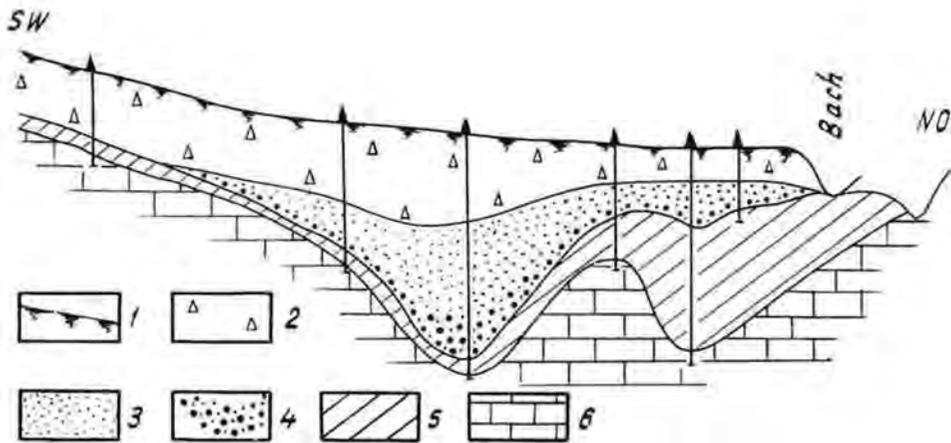


Fig. 3: Diluviale Diamantseife im Karstrichter der durchgefrorenen Gesteine (B. I. PROKOPIŠCHUK, 1979). 1 – Bodenschicht; 2 – Diluvium; 3 – diluviale Diamantseife; 4 – höherer Diamantengehalt in der Seife; 5 – Verwitterungskruste; 6 – Karbonatgestein.

Flusses Wiluj) in 1,4–3 m mächtigen subhorizontalen Gipsschichten des Ordoviziums dienen. Die Höhlen sind ganzjährig mit Eis verstopft. In der Jakutischen diamantführenden Provinz findet man diluviale Diamantstreifen in Karstrichtern eines flachen Hanges (Fig. 3).

### 3. Methoden und Ergebnisse der Untersuchung der Wasser-Frostkarst-Wechselwirkung

Die Untersuchungen wurden innerhalb der Sibirischen Tafel und ihrer Faltengebirgs-Einfassung durchgeführt. Die Mächtigkeit der mehrjährig gefrorenen Serien schwankt hier von 0–50 m (inselhafte Gefrornis) bis 200–500 m und mehr (geschlossene Gefrornis).

Ohne die geokryologische Terminologie, die in einem Sonderwerk von E. V. PINNEKER & B. I. PIŠSARSKI (1975) besprochen wird, zu berühren, werden wir die Methoden und Ergebnisse der Untersuchung der Wasser-Frostkarst-Wechselwirkung charakterisieren. Je nach der Zweckbestimmung wurden folgende Methoden verwendet:

a) **Paläohydrologische Umgestaltungen**, die eine historische Grundlage für die Feststellung der Gesetzmäßigkeiten der Frostkarstentwicklung unter dem Einwirken des Grundwassers geben. Es wurden in bezug auf Karbonatkarst einige Epochen der Karstbildung seit dem Proterozoikum für die Sibirische Tafel und ihre Faltengebirgs-Umrahmung bestimmt. Der mittelkambrische, präjurassische (Perm–Trias) sowie der postmesozoische (rezente) Karst sind am besten erforscht.

Über das Permafrostalter im N Eurasiens sind die Forscher verschiedener Meinung. Weitverbreitet ist die folgende Auffassung: die Ewige Gefrornis ist ein Produkt der klimatischen Erscheinungen (vorrangig der wiederholten Vereisungen); in seinem rezenten Zustand wird der Permafrost das komplizierte natürliche System „Permafrost-Grundwasser-Karst“ dem Spätpleistozän (vor etwa 10–15 000 Jahren) zugerechnet.

Die Intensivität der unterirdischen chemischen Denudation hängt von dem Charakter der karstbildenden Gesteine, der geologischen Geschichte sowie von sonstigen Faktoren ab. In südlichen Regionen der Sibirischen Tafel, d. h. im Gebiet der inselhaften Gefornis, ist z. B. der Denudationswert fast immer höher als 1–1,5 cm/1000 Jahre, während er in nördlichen Regionen, beim kompakt entwickelten Permafrost, höchstens 0,5 cm/1000 Jahre beträgt. Dieser Wert ist für nördliche Flachländer außerordentlich niedrig (weniger als 0,25 cm pro Jahrtausend). Gleich den Karbonatgesteinen verläuft auch die Gipsauslaugung. Im Norden Ostsibiriens dient der Fluß Lena als Hauptintegrator der Abtragungstoffe der chemischen Denudation des Karstes: im Laufe eines Jahreszyklus transportiert er eine große Menge (55 Mill. t) von gelösten Stoffen ins Meer (S. S. KORSHUJEW, 1967).

Der Salzkarst hat sich aus der Auslaugung der Oberflöze der salzföhrnden Schichtenfolgen ergeben. Wie die Mächtigkeit der verbliebenen Reste unter den überdeckenden Dolomiten zeigt, wurden von der oberen Steinsalzschieht der Sibirischen Tafel 100–200 m korrodiert. Die unter dem Permafrost liegenden Salzlösungen rufen eine Degradation der Sohlen der mehrjährig gefrorenen Gesteine hervor, wofür der anomal niedrige Druck des unter dem Permafrost liegenden Wassers im Mittellauf des Lena-Flusses spricht.<sup>2)</sup>

Die Anzahl der Salzwasserquellen vom sulfatischen und chloridischen Bestand steigt an der Sibirischen Tafel auf über 500. Die hohe Mineralisation des Flußwassers kann man als Gradmesser der Auslaugung von salzhaltigen Schichtenfolgen betrachten. Nahe der Siedlung Tura z. B. beträgt die Wasserm mineralisation im Fluß Nishnjaja Tunguska (einem wasserreichen Fluß im Gebiet des geschlossenen Permafrostes, an dessen Ufern mehrere Solquellen austreten) während des Normalwasserstandes ca. 1,5 g/l, bei der Durchflußmenge von 6,0 m<sup>3</sup>/s.

Mächtige Salzablagerungen entwickeln sich oft im Gebiet der beim Dränieren des Salzkarstes entstehenden Aufeisstellen. Als Beispiel kann das Aufeis um den Salzdiapir Kempendjai in Jakutia am Kontakt des Salzkörpers mit Wirtgesteinen dienen (Fig. 4). Beim Aufstauen des Eises im Sommer wird das Wasser aus dem Hydrohalit ausgeschieden, und es bildet sich reines Kochsalz.

Wie die Isotopenbestimmungen (<sup>2</sup>H und <sup>18</sup>O) zeigen, sind die über der Ewigen Gefornis liegenden Wässer meteorischer Herkunft. Das anhand der Tritiummethode bestimmte Alter dieses Wassers ist ein bis zwei Jahre. Von ähnlicher Genese sind die meisten Talik-Wässer, doch beträgt ihr Alter Jahrzehnte. Ein solches Alter haben auch Wässer kombinierter Infiltrations-Sedimentationsherkunft unter der Ewigen Gefornis liegender Solen von calcium-chloridischer Zusammensetzung.

**b) Die hydrologisch-hydrogeologische Komplexmethode** zur Untersuchung des Grundwasserabflusses. Sie basiert auf der Gliederung des Flußhydrographs sowie auf der Bestimmung der unterirdischen Speisung und kennzeichnet indirekt die Intensität der rezenten Karstbildung.

Die höchsten Modulkennziffern für den Grundwasserabfluß (5–15 l/s × km<sup>2</sup>) sowie die chemischen Denudationskennziffern sind für die südlichen Regionen der Sibirischen Tafel charakteristisch, d. h. die Gebiete der inselhaften Verbreitung der mehrjährig gefrorenen Gesteine, in den Stellen, wo die Karbonat- und gipsföhrnden Gesteine zutage treten. In Gebieten der geschlossenen Verbreitung der mehrjährig gefrorenen Gesteine, besonders in Grenzen der oben erwähnten nördlichen Ebenen,

<sup>2)</sup> Es gibt auch andere Auffassungen vom Wesen des anomal niedrigen Grundwasser-Drucks im Mittellauf des Lena-Flusses (siehe Hydrologie der UdSSR, Bd. XX, 1970).

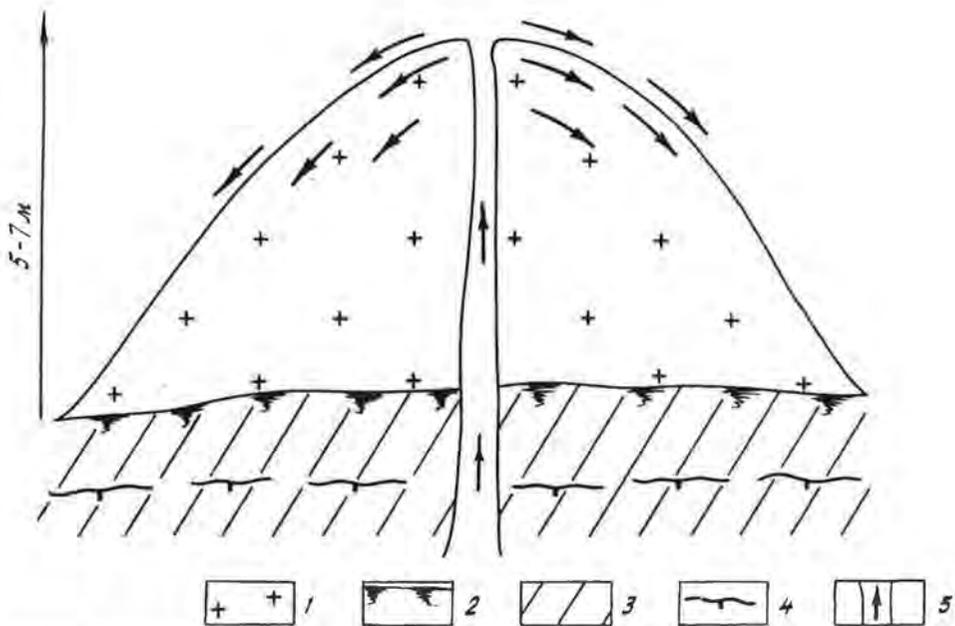


Fig. 4: Kempendjaisches Salzaufeis des Hydrohalits (A. I. DSENS-LITOWSKI, 1966). 1 – Winterablagerungen des Hydrohalits; 2 – Bodenschicht; 3 – Muttergesteine; 4 – obere Grenze der mehrjährigen Gefrornis; 5 – Solenaustrittskanal und Richtung der Wasserbewegung.

sinkt der Modul des Grundwasserabflusses bis auf  $0,5-1,0 \text{ l/s} \times \text{km}^2$ , was auch dem langsamen Verlauf der Karstbildung entspricht.

Die Beurteilung des Aufeis-Abflusses mit Hilfe der Entzifferung der Luftbilder ist eine der Modifikationen der hydrologisch-hydrogeologischen Komplexmethode. Diese Modifikation ist ergebnisreich bei Verwendung in schwer zugänglichen Regionen Sibiriens, wo andere Beurteilungsvarianten zu kostspielig sind.

Da das Aufeis den im Winter konservierten Grundwasserabfluß in der Gegend der Quelle darstellt, dienen immer die größeren Aufeise in verkarsteten Regionen als Anzeichen der beträchtlichen mit Wasser gefüllten Karsthohlräume. Solche in der Regel mit dem Karbonatkarst oder den Querauftauböden verbundenen Aufeise werden als Prospektionskriterien für große Lagerstätten von unterirdischen Süßwässern genützt.

c) **Physikalisch-chemische Untersuchung** der kryogenen Prozesse (anders gesagt, der Wechselwirkung zwischen gefrorenen Karstgesteinen und dem bei Minustemperaturen in den Mikrohohlräumen beibehaltenen flüssigen  $\text{H}_2\text{O}$ ). Sie dient als Basis zur Feststellung des „Wasser-Gestein“-Zusammenwirkens. Allmähliche Zerstörung der verkarsteten Gesteine sowie durchlaufende Anhäufung von zerbrochenen Stoffen stellen eine wichtige Besonderheit der **Kryogenese** dar.

Die Kryogenese ist höchst intensiv, wenn geeignete Bedingungen für die Beseitigung der Zerfallprodukte vorhanden sind. Es sind dies jene Schichten, wo sich, wie schon erwähnt wurde, die Karstformen wie z. B. Einsturztrichter, Höhlen und Gräben sowie die Böschungsabtragung intensiv entwickeln. Die Karstbildung in dem über der Ewigen Gefrornis liegenden wasserführenden Horizont wird durch periodisches Einfrieren und Auftauen begünstigt, was zur Neuverteilung sowohl

von Feuchtigkeit als auch chemischen Elementen führt. Beobachtungen zeigen, daß die löslichen Stoffe in der „tätigen“ Schicht im Herbst und Winter aufwärts und im Frühling und Sommer in tiefere Horizonte migrieren.

Im Inneren der durchgefrorenen Gesteinsmassen verlaufen die physikalisch-chemischen Prozesse vorwiegend an der Phasengrenzfläche; sie entstehen und entwickeln sich aufgrund der Veränderung der Konzentrierungsgrade der Oberflächenenergie bei der „Wasser-Gestein“-Wechselwirkung an dieser Grenze. Laut dem Modell von I. A. Tjutjunow (1960) steigt das Änderungstempo der chemischen Prozesse mit Senkung der Temperatur und Konzentration der zur Wechselwirkung herangezogenen Stoffe. Gerade so verläuft wahrscheinlich die gegenwärtige Karstbildung innerhalb der mächtigen Schichtfolgen von durchgefrorenen Gesteinen. Dieser Prozeß ist leider in Feldbedingungen noch nicht hinlänglich erforscht; doch sind seine Spuren als Karstformen gut bemerkbar.

Die obengenannten drei Methoden stellen bei weitem nicht alle Untersuchungsverfahren zur Wechselwirkung zwischen Grundwässern und gefrorenen Karstgesteinen dar. Sie sind nur Hauptmethoden. Überdies wird bei hydrogeologischen Frostkarst-Untersuchungen in Ostsibirien ein umfassendes Paket der herkömmlichen Methoden, wie geophysikalische, einschließlich Thermometrie und Elektrosondierung, geochemisches Modellieren sowie Verwendung von Tracern zur Karstwassererforschung genützt.

#### 4. Die Eiskarstvorkommen

In „üblichen“ Naturbedingungen sind Karst und Ewige Gefrorenis einander antagonistisch. Doch hat diese Regel eine den Eiskarst betreffende Ausnahme. Der Eiskarst entsteht beim Zusammenwirken der eishaltigen durchgefrorenen Gesteine mit Solen (Salzlösungen) sowie bei dem Auftauen der Eiseinschlüsse und der Zerstörung des Eiskörpers.

In der Sohle der bis zur Tiefe von 200–500 m und sogar 1500 m durchgefrorenen Gesteine im N der Sibirischen Tafel liegen die Minustemperatursolen. N. I. Tolstichin hat diese außergewöhnliche Erscheinung Kryopegen genannt. Beim Kontakt mit den ungesalzenen Eiseinschlüssen verursachen sie ein allmähliches Einschmelzen. Als Ergebnis wird die Ewige Gefrorenis verringert. Ungesalzene Eis wird durch die Minustemperatur-Solen verdrängt, und die Eiskarstbildung setzt ein. Verläuft dieser Prozeß unbegrenzt?

Die Feld- und Experimentalbeobachtungen zeigen (E. V. Pinnerker et al., 1989), daß eine entsalzene Wasserschicht zwischen dem Eis und der Salzlösung unter den typischen Umständen, wenn die Minustemperatur-Solen unter den gefrorenen Gesteinen liegen, entsteht (Fig. 5). Wenn das System geschlossen ist, wird das Eis schmelzen, wie Experimente zeigen, in kurzer Zeit unterbrochen und allmählich aufhören. Die mehrjährig gefrorene Gesteinsschichtenfolge neigt sogar bei großer Mächtigkeit der unterliegenden Minustemperatur-Solen, zur Beibehaltung der Situation. Die zwischen der gefrorenen Schichtenfolge und den Salzlösungen liegende entsalzene Wasserschicht hat, wie geophysikalische Daten bezeugen, regionale Verbreitung im artesischen Becken Olenekski (W. I. Kalinin & W. S. Jakupow, 1989).

Demgegenüber verläuft der oben beschriebene Prozeß ganz verschieden, wenn Salzlösungen über dem Eis liegen. Dieser Umstand ermöglicht die Dichtigkeits-

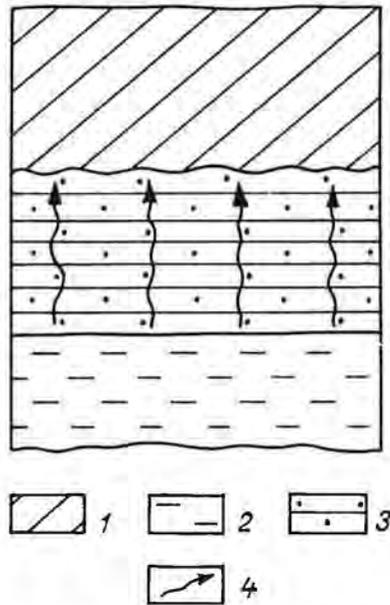


Fig. 5: Zusammenwirkung der den gefrorenen Gesteinsschichten unterliegenden Solen mit dem Eis. 1 – Eis oder eishaltige Frostgesteine; 2 – die Minustemperatur-Solen; 3 – Karbonat- oder terrigene Gesteine mit entsalzenen Wässern; 4 – Richtung der Solenbewegung.

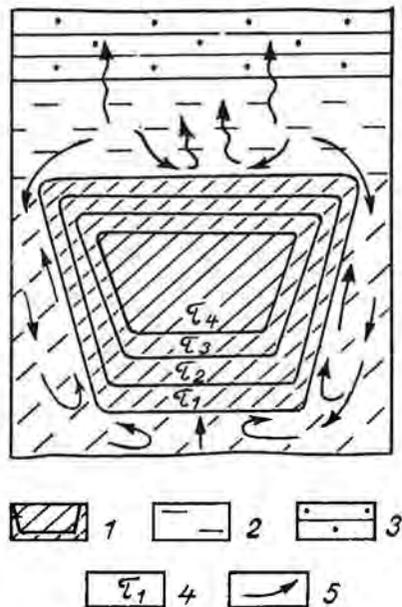


Fig. 6: Zusammenwirkung der über den Frostgesteinen liegenden Solen mit dem Eis. 1 – Eis oder eishaltige Frostgesteine (unterbrochene Linie bezeichnet das ausgelaugte Eis); 2 – die Minustemperatur-Solen; 3 – die Karbonat- oder terrigenen Gesteine mit entsalzenen Wässern; 4 – Grenzenlage des Eiskörpers in der Ti-Periode; 5 – Richtung der Grundwasserbewegung.

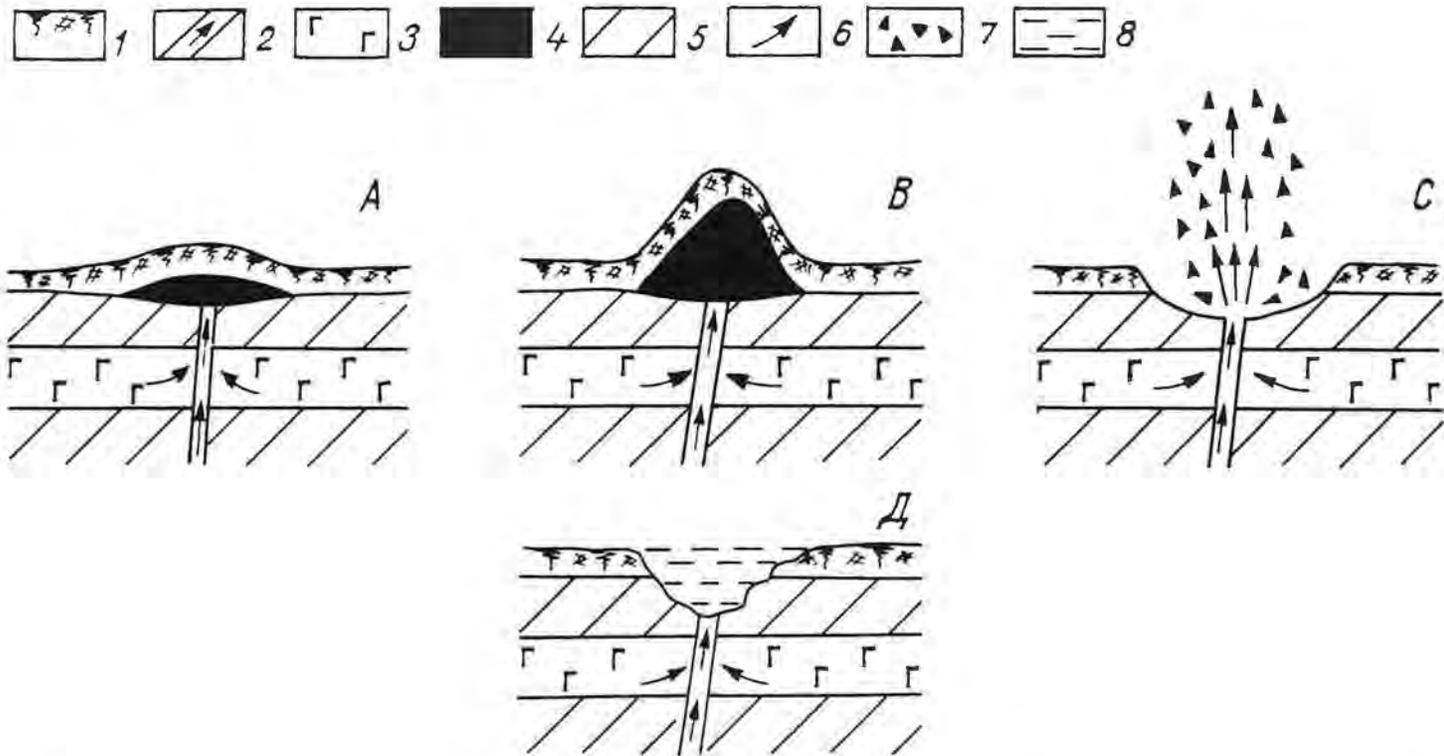


Fig. 7: Schema der Bildung des Thermokarsttrichters aus dem Hydrolakkolithen. 1 – Bodenschicht und Eluvium; 2 – grundwasserwegiger Bruch; 3 – verkarstete Gesteine; 4 – Eis; 5 – wasserdichte Gesteine; 6 – Richtung der Grundwasserbewegung; 7 – Zerstörungsprodukte des Hydrolakkolithen; 8 – Wasser (im Thermokarstsee). Entwicklungsstadien des Thermokarstes: A – Hydrolakkolith im Anfangsstadium (mit der Eislinse); B – Hydrolakkolith im kritischen Stadium (mit mächtigem Eiskörper); C – Hydrolakkolithen-Sprengung; D – Bildung des mit Wasser ausgefüllten Thermokarsttrichters.

konvektion: schwere Salzlösungen migrieren nach unten. Sie verdrängen dabei das entsalzene Wasser nach oben aufwärts. Der mit der Salzlösung bei Temperaturen von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $-12^{\circ}\text{C}$  durchgeführte Versuch verlief schnell und hat den Eiskörper geschmolzen (Fig. 6).

Man kann auch andere Formen des Eiskarstes, d. h. den sogenannten Thermokarst und seine Abart als Ergebnis der Hydrolakkolithen-Sprengung beobachten.

Das von der „tätigen“ Schicht beginnende Durchtauen der eishaltigen Frostgesteine führt zur Senkung der Geländeoberfläche. Dieser Prozeß ist sowohl in den jahreszeitlich, als auch in den mehrjährig gefrorenen Gesteinen zu beobachten. Dies verursacht die Entstehung von Einsturztrichtern sowie von sonstigen Negativformen des Reliefs, die in russischer Literatur als Thermokarst bezeichnet wurden. Der Mechanismus der Thermokarstbildung besteht in einer Verdichtung der auftauenden eishaltigen Gesteine und führt nicht nur zur Einsturztrichterentstehung, sondern auch zu diesen umfassenden Reliefsenkungen auf einem riesigen Territorium. Der Thermokarst ist in nördlichen Flachländern weit verbreitet. Mitunter werden diese Negativformen des Reliefs mit Wasser gefüllt, wobei sogar Seen entstehen.

Die Thermokarsttrichter können überdies eine andere Herkunft haben, d. h. sie können als Ergebnisse der Hydrolakkolithen-Sprengung auftreten (Fig. 7). Die Hydrolakkolithe stellen die Quelhügel dar, die an der Geländeoberfläche bei der Injektion des Wassers unter Einwirkung des hydrodynamischen Drucks von über sowie unter der Gefronnis liegenden Wässern entstehen. Die Hügelentstehung wird durch das Anwachsen des ihn bildenden Eiskörpers in den Grundwasseraustrittsherden verursacht. Ein solcher Quelhügel wächst bis zum Erreichen eines bestimmten kritischen Zustandes, dann explodiert er, und ein mit dem Wasser im Sommer und dem Eis im Winter anfüllbarer Einsturztrichter entsteht an seiner Stelle.

Nicht nur die Quelhügel mit den in ihrem Inneren anwachsenden Eiskernen, sondern auch die sich dank den ununterbrochenen Grundwasseraustritten erweiternden Aufeise neigen zum Explodieren. W. A. DERPHOLZ (1971) beschreibt einen Zwischenfall: im Jahre 1932 hat eine Pferdekarawane das Aufeis am Fluß Seja betreten, was die „Gefronnis-Wasser-Gestein“-Balance verletzt und eine so mächtige Explosion provoziert hat, daß nur ein Junge aus Dutzenden Menschen am Leben blieb; er wurde auf hunderte Meter durch die Sprengwelle zur Seite geworfen.

## Zusammenfassung

Der Frostkarst, d. h. der in der Permafrostzone entwickelte Karst, ist in Ostsibirien weitverbreitet. Er ist den Regionen von negativen Temperaturen eigen.

Eine der Hauptbesonderheiten des Frostkarstes besteht in seinem herdweisen Vorkommen und seiner sporadischen Verbreitung. Er ist vornehmlich in:

1. der jahreszeitlich aufgetauten Schicht,
2. den Auftauböden (in Russisch sogenannten Taliken) und Territorien mit der inselhaften Gefronnis und
3. den Sohlen der geschlossenen Permafrostböden zu beobachten.

Es gibt einige Methoden zur Erforschung der Wechselwirkung zwischen Grundwässern und dem Frostkarst:

1. die paläohydrogeologischen Umgestaltungen,
2. die hydrologisch-hydrogeologische Komplexmethode und
3. die physikalisch-chemische Untersuchung u. a..

Neben den allgemein bekannten Erforschungsverfahren wird auch der eishaltige Karst und seine Arten (z. B. der Thermokarst und Folgerungen der Hydrokolkolithen-Sprengung) beschrieben.

## Literatur

- DERPHOLZ, W. F. (1971): Wasser im Weltall. – Verlag „Nedra“, 224 S., Leningrad (in russ. Sprache).
- DSSENS-LITOWSKI, A. I. (1966): Salzkarst der UdSSR. – Verlag „Nedra“, 168 S., Leningrad (in russ. Sprache).
- HYDROGEOLOGIE DER UDSSR (1970): Bd. XX (Jakutische Republik). – Verlag „Nedra“, 383 S., Moskau (in russ. Sprache).
- KALININ, W. I. & W. S. JAKUPOW (1989): Regionale Gesetzmäßigkeiten des Verhaltens der mächtigen gefrorenen Schichtenfolgen. – 142 S., Jakutsk (in russ. Sprache).
- KORSHUJEW, S. S. (1967): Karst und Ewige Gefornis. – Im Sammelband: „Sowjetische Erforschungen des Karstes innerhalb 50 Jahre“. – Verlag der Moskauer Staatsuniversität, 54–60, Moskau (in russ. Sprache).
- LWOW, A. W. (1916): Prospektion und Prüfung der Wasserversorgungsquellen im westlichen Abschnitt der Amursker Eisenbahn unter Bedingungen des ewig gefrorenen Bodens. – 881 S., Irkutsk (in russ. Sprache).
- MIDDENDORF, A. F. (1861): Die Reise nach Norden und Osten Sibiriens. Teil I, Heft 2, Abschnitt 2; Orographie und Geognosie. – St. Petersburg (in russ. Sprache).
- PHILIPPOW, A. G. (1984): Besonderheiten des Frostkarstes – Kurzfassungen zum Bericht für Konferenz. Wissenschaftler in Geologie und Geophysik Ostsibiriens. – 159 S., Irkutsk (in russ. Sprache).
- PINNEKER, E. V. & B. I. PISSARSKI (1975): Die Besonderheiten der Bildung der Untergrundwasserzusammensetzung im Gebiet Ewiger Gefornis. – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 27, 5–27, Graz (in deutsch. Sprache).
- PINNEKER, E. V. et al. (1989): The Interaction of Brines and Permafrost. – Water-Rock Interaction WRI-6, 557–560, Rotterdam (in engl. Sprache).
- PROKOPTSCHUK, B. I. (1979): Diamantseifen und ihre Prognosen- und Prospektionsmethoden. – Verlag „Nedra“, 248 S., Moskau (in russ. Sprache).
- RODIONOW, N. W. (1972): Karst, Grundwasserabfluß und mehrjährige Gefornis. – Im Sammelband: Grundwasserabfluß und seine Erforschungsmethoden. – Verlag „Nauka“, 13–23, Moskau (in russ. Sprache).
- SOKOLOW, D. S. (1962): Grundsätzliche Bedingungen zur Karstentwicklung. – Verlag „Gosgeoltechisdat“, 322 S., Moskau (in russ. Sprache).
- SUCHODOLSKI, S. E. (1982): Die Paragenese der Grundwässer und mehrjährig gefrorenen Gesteine. – Verlag „Nauka“, 152 S., Moskau (in russ. Sprache).
- TJUTJUNOW, I. A. (1960): Prozesse der Änderung und Umwandlung von Böden und Gesteinen unter den Minustemperaturen. – Verlag der AdW der UdSSR, 144 S., Moskau (in russ. Sprache).

## Summary

The "Frostkarst" i.e. the karst developed in the Permafrost zone is a well-known phenomenon in Eastern Siberia.

A special feature of Frostkarst is the appearance of its phenomena in sporadic and wide-spread groups. It mainly occurs in seasonal thawing beds, in summer thawing soil (Auftauboden, in Russian "Talikes"), and at the underground border of closed permafrost areas.

There are various methods to study the reciprocal action of groundwater and Frostkarst:

- 1) the study of paleohydrogeological transformation,
- 2) the investigation of the hydrological-hydrogeological complex method and
- 3) physical and chemical measurements.

At last we find two important definitions missing in the German karst terminology: the definition of the term "Thermokarst" which means a hydrological permafrost phenomenon in a paleo-carbonat karst. The geographical examples in German language are wrong. A new term is the "Hydrolakkolithensprengung" describing a phantastic phenomenon of the permafrost.