

A. I. Popov
Moskva

LE THERMOKARST

Sommaire

Le thermokarst est un phénomène de l'affaissement du sol provoqué par le dégel des roches gelées ou de la glace fossile. La manière du gisement et la quantité de glace dans la roche décident du façonnement des formes du relief thermokarstique. Les formes thermokarstiques peu profondes se constituent dans les régions Sud où la quantité de couches et de veines de glace dans le sol diminue avec la profondeur. Dans les régions du Nord — régions du pergélisol où les couches et les veines de glace sont disposées uniformément à de grandes profondeurs — apparaissent au moment du dégel et de l'affaissement du sol de grandes et profondes formes thermokarstiques.

La montée de température ne décide pas seule du développement du thermokarst. Souvent ce processus a lieu aussi dans de rudes conditions climatiques continentales.

I

Le thermokarst est au fond un phénomène bien pareil au karst ordinaire qu'on rencontre le plus souvent en dehors de la région du pergélisol. Ce phénomène dû à la fonte de la glace dans les roches contenant de la glace a beaucoup d'analogie avec la dissolution des roches carbonatées et gypseuses et en conséquence la constitution des formations négatives du relief. Le thermokarst ne présente d'analogies avec le karst que dans les manifestations extérieures et il est typique uniquement pour le pergélisol (2). De plus le karst thermique ou thermokarst et le karst, au sens habituel du mot, sont des phénomènes presque incompatibles: là, où l'on rencontre le thermokarst, les processus purement karstiques ne se produisent habituellement pas; là, où a lieu la lessivage des calcaires ou des roches gypseuses — le thermokarst fait défaut. C'est très compréhensible, car le thermokarst se développe dans une température relativement basse, près de 0°. Dans ces conditions l'activité des processus chimiques est faible et la formation actuelle et normale des karsts peut se manifester quelque peu activement. Pourtant le karst lié à la lessivage des roches carbonatées et gypseuses se développe habituellement dans une température positive, comparativement haute, qui exclut absolument l'existence du thermokarst. De cette façon le karst thermique et le karst chimique sont, comme on le voit, antagonistes.

La notion *thermokarst* a deux aspects: thermophysique et géomorphologique. Le premier est déterminé par le facteur thermique: la

hausse de température provoquant la fonte des glaces dans les séries des roches. L'autre aspect est défini par l'affaissement de la surface produit à la suite de l'essorage de l'eau provenant de la fonte des glaces et de la condensation de la roche. Plus rarement l'affaissement se produit par la diminution du volume dû à la transformation de la glace en eau.

Tout le problème concernant le dégel des roches à glace et le changement de volume qui en résulte est assez vaste et compliqué et dépasse les limites de la notion généralement admise — de *thermokarst*.

On sait que le dégel des sols gelés dans les conditions d'une couche active se produit tous les ans sur des espaces très étendus. Pourtant le gel et le dégel systématiques et relativement stables de la couche active, même en présence de sols très humides en été et gelés en hiver, n'amènent pas de changement important de surface ou bien ils y produisent un changement de courte durée disparaissant après le dégel complet de la couche active. Par conséquent, en définissant le sens du terme *thermokarst* nous ne pouvons pas nous borner à indiquer le changement de volume de la roche provenant de la fonte de la glace qui y était contenue.

En général le terme de *fonte* ne peut être appliqué aux roches ayant une température inférieure à 0°, mais privées de glace. Dans ce cas on ne peut parler que de la transition de température d'une valeur négative à une valeur positive, au cours de laquelle la roche ne subit aucun changement visible. Le dégel des sols à faible contenu de glace est d'un faible effet sur la réduction de leur volume. Seule la fonte de la glace fossile et le dégel des roches contenant beaucoup de glace amènent une réduction considérable de leur volume et l'affaissement du terrain. Par conséquent la proportion de la teneur en glace de la roche est un facteur déterminant la possibilité même du développement des formes d'affaissement du relief c'est-à-dire de la formation du thermokarst. C'est pourquoi nous n'allons pas étudier tout dégel de roches à glace, mais seulement celui qui apparaît à quelque degré que ce soit dans le relief et qui a lieu dans des conditions où les roches renferment une quantité suffisante de glace.

Les changements de relief (affaissement) se produisent uniquement dans le cas où, pour certaines raisons, le dégel commence à dépasser la profondeur préalablement établie et correspondant à celle de la couche active du lieu donné. En outre ces changements se produisent aussi si le dégel embrasse les roches fortement englacées ou bien la glace fossile. L'abaissement de la surface qui en résulte amène inévitablement à sa

suite un dégel ultérieur dû à l'abaissement de la couche active. Ce dernier dégel peut se transformer en un dégel progressif que la congélation saisonnière provenant d'en haut ne peut compenser. Le dégel progressif entraîne une rupture entre la surface supérieure du pergélisol et la base de la couche active. De plus il entraîne toujours la formation d'une couche dégelée entre le pergélisol et la *merzłota* saisonnière.

L'affaissement local de la surface provoque inévitablement le changement des conditions extérieures (accumulation de la neige, humidification démesurée — formation de marécages et de lacs, etc.) d'où résulte le changement du régime thermique des roches et finalement, dans certains cas, le dégel progressif.

L'interruption produite dans le dégel des sols à glace est déterminée par des conditions extérieures nouvellement formées: microclimat, humidification de la surface, végétation etc., aussi bien que par les propriétés thermiques des roches mêmes (à l'exception de l'achèvement complet du dégel causé par le dégel total du sol). L'interruption du dégel se produit aussi dans le cas où la couche, formée grâce à l'accumulation des matériaux minéraux provenant des glaces fondues, est devenue plus épaisse que la couche active.

Plus la période de stabilisation du dégel est longue, plus l'effet de son action sur le relief est important et l'affaissement considérable. Cela concerne non seulement le dégel allant verticalement de haut en bas, mais aussi le dégel latéral. On doit considérer la fonte et l'écart causé par elle des formes négatives ou positives du relief (indépendamment de leur hauteur) vers des versants plus ou moins raides comme un dégel résultant de l'écart de surface et parfois comme le dégel progressif (par exemple certains versants exposés au Sud). Il est évident que nous éliminons le rôle de l'érosion ou de la solifluction qui sans cela favorisent le dégel parfois progressif et le déplacement des versants.

Cependant le dégel est la cause de la parution des formes du thermokarst propre lorsqu'il joue un rôle déterminant et ne se lie pas — ou se lie à un degré minime — avec d'autres facteurs. Par exemple le dégel progressif des roches perpétuellement gelées (contenant souvent de la glace) au-dessous des lits des fleuves et des rivières, peut à peine être pris pour phénomène de thermokarst, dans le sens habituel du terme, dans le cas de déplacement latéral de ces lits, étant donné qu'un tel dégel ne se manifeste pas dans le relief.

De cette façon le thermokarst est un phénomène d'affaissement de surface causant le changement du relief. Ce phénomène provient du dégel des roches à glace ou de celui de la glace fossile causé par l'accroissement de l'éboulement de la couche active et de sa descente

consécutive arrivant à la suite de l'affaissement ou au cours du dégel progressif.

Il résulte de ce qui vient d'être exposé que la présence de la glace est la condition principale pour l'accomplissement du processus du thermokarst. La cause principale de ce processus réside dans le changement du régime thermique aux horizons superficiels des roches et dans l'épaississement de la couche active.

Autrement dit la condition principale du thermokarst réside dans la structure géologique spécifique (glace dans les roches); la cause principale est le facteur thermophysique (échange de chaleur dans les roches).

Les causes stimulantes du thermokarst peuvent être toutes différentes. Elles peuvent être divisées en deux catégories principales: causes générales et causes particulières.

Aux causes les plus générales on peut rattacher:

1° l'adoucissement du climat (élévation de la température moyenne annuelle de l'air), qui pourtant n'a pas lieu toujours;

2° renforcement du climat continental qui accompagne, comme de règle l'élévation de la température estivale et en conséquence un plus profond dégel, c'est-à-dire l'épaississement de la couche active.

V. Kudryavcev a démontré que l'adoucissement général du climat, l'élévation générale de la température annuelle moyenne sont loin de provoquer l'accroissement de la profondeur de la couche active étant donné qu'il peut être accompagné de l'affaiblissement des traits caractéristiques du climat continental. Cet affaiblissement, comme le croit V. Kudryavcev, provoque la diminution de l'échange de chaleur dans les sols et une baisse correspondante de température (principalement pendant la période estivale) et, par conséquent, la diminution de la profondeur du dégel — ce qui ne conduit pas au thermokarst. Par contre, le renforcement du climat continental cause un plus vif échange de chaleur dans les sols, une élévation relative de température (surtout pendant la période estivale) et un accroissement consécutif du dégel estival qui, dans des conditions géologiques propices, cause la formation du thermokarst. Les causes générales de la formation du thermokarst, vu l'existence des roches à glace gisant à une faible profondeur, peuvent provoquer le développement de ce processus sur de grandes étendues des continents.

Comme causes particulières du thermokarst, on peut citer les incendies des forêts, les différentes fissures et autres ruptures de la surface, la foulée de la couverture herbeuse et moussue par les bestiaux, de même que l'activité de l'homme telle que: le déboisement, la mise en culture,

la construction de différents bâtiments, la construction des voies de communications (3). Les causes particulières énumérées provoquent un changement plus localisé des conditions thermo-physiques de la congélation et du dégel des sols. Changement allant le plus souvent vers l'accroissement de la profondeur de la couche active et, ce qui est tout naturel, la formation du thermokarst dans le cas d'une structure géologique favorable.

Il faut dire que le côté thermophysique du processus thermokarstique est très complexe, qu'il n'a pas été suffisamment approfondi et qu'il a été présenté dans la littérature d'une manière succincte.

II

La condition principale du thermokarst — la glace et les roches à glace faisant partie des couches du sol gelé — déterminent le relief et, à un important degré, l'intensité du développement du processus thermokarstique tant en surface qu'en profondeur. C'est là la cause pour laquelle il est tout opportun d'étudier les formes du gisement de la glace fossile et des roches à glace plutôt que de s'adresser à la morphologie même du thermokarst.

Jusqu'aux temps derniers la morphologie du thermokarst ne se liait nullement — ou à un faible degré — avec le substratum géologique et les formes du gisement de la glace. Les observations et les généralisations faites au cours des dernières années permettent de procéder avec plus de certitude qu'il n'était possible de le faire jadis à l'évaluation des régularités des gisements de glace dans les couches du sol gelé en les considérant comme base du processus thermokarstique.

A notre avis, l'essence du processus de congélation se manifeste dans la régularité de la répartition de la glace dans les couches des roches. Cette régularité est un indice génétique des plus généraux dans lequel s'est concentrée comme dans un foyer optique, l'influence conjointe de différents facteurs géophysiques et géologiques. La structure des couches du sol gelé se révélant dans la régularité de la répartition de la glace est l'indice essentiel des conditions historico-géologiques dans lesquelles se forme le pergélisol.

Après avoir fait, à la lumière du principe génétique indiqué, l'étude de la structure des couches contenant de la glace dans la région où le thermokarst se développait, nous sommes arrivés à cette conclusion qu'il existait deux types principaux de la structure génétique de ces couches et qu'elles étaient le plus fréquentes. En comparaison avec ces deux types génétiques des couches perpétuellement gelées, tous les autres types génétiques occupent une place secondaire, sont beaucoup

moins répandus et ont une moindre importance pour la détermination du thermokarst.

1. Le premier de ces deux types correspond aux dépôts argilo-limoneux d'origine hydroglaciaire, glaciaire, marine, alluviale ou lacustre. Il est caractérisé par une répartition régulière de la glace en profondeur donnant aux roches perpétuellement gelées une structure spécifique de *merzlota*. Cette régularité se manifeste en ce qu'on observe avec la profondeur une raréfaction graduelle des couches horizontales

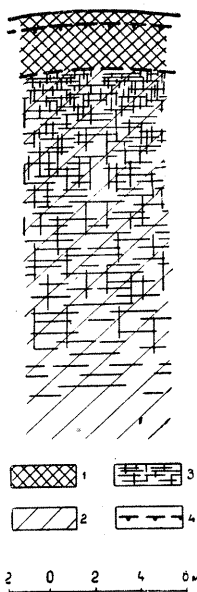


Fig. 1. Grillage de glace coupant la profondeur du limon gelé

1. tourbe; 2. limon;
3. couches et veines de
glace; 4. surface supé-
rieure de pergélisol

de glace et des fines veines verticales qui leur sont perpendiculaires. Celles-ci se trouvent dans la roche limoneuse et forment une disposition à carreaux (fig. 1). En même temps que la raréfaction et l'élargissement des carreaux, on observe l'épaississement graduel et régulier des couches de glace interstitielles et horizontales ainsi que des veines verticales, perpendiculaires à ces couches encadrant les parallélépipèdes du sol. L'épaisseur des couches de glace et des veines varie de 0,5 à 1 cm près de la surface et de 10 à 20 cm à la profondeur de 15 à 20 m. Habituellement, on observe à une profondeur au-dessous de 15—20 m une quantité insignifiante ou une absence complète de glace dans le sol. Ce fort appauvrissement du sol en glace à une profondeur au-dessous de 15—20 m a une très grosse importance pour la morphologie du thermokarst.

Le tableau de la disposition régulière des couches perpétuellement gelées prouve, à notre avis, la congélation épigénique des roches molles argileuses après leur affaissement qui s'est produit sans l'intervention de la *merzlota*. La congélation suivante quand les gradients (probablement pas trop grands) de température sont adéquats, conditionne la migration des eaux des profondeurs relativement grandes, de bas en haut vers le front de la congélation. A mesure que la congélation des sols pénétrait plus profondément et que pour cette raison la *merzlota* du bas grandissait de plus en plus lentement, l'effet de la migration s'avérait de plus en plus grand dans le temps. Cet effet se manifestait par la montée de l'eau vers le front de la congélation et la formation avec la profondeur des couches horizontales de plus en plus fortes et des veines verticales de glace dans la roche argileuse qui était en train de geler.

La structure seule de ces couches perpétuellement gelées est conditionnée probablement par le système primordial des fissures perpendiculaires à elles-mêmes s'intersectant avec la profondeur. Ces fissures se produisent dans n'importe quelle roche non gelée à la fixation du gradient de température et d'humidité (d'après B. N. Dostovalov). En conséquence ces fissures sont remplies par l'eau qui s'écoule et gèle et il se forme en même temps un grillage de glace.

Une telle structure apparaît d'une façon bien visible dans les limons sur lesquels reposent les buttes gazonnées accidentées par suite de la migration particulièrement intense des eaux. Cette migration eut lieu dans le passé pendant la congélation des marécages tourbeux tout d'abord bien plats et fortement imbibés d'eau (5). En même temps se produisaient près de la surface de considérables accumulations de glace qui formaient souvent des lentilles de glace dans des buttes de tourbe développées, par exemple, sur les grandes étendues de la taïga sibérienne de l'ouest.

2. La structure des couches gelées du second type possède un tout autre caractère. Ces couches sont représentées au Nord par des dépôts considérables, surtout alluviaux, argileux et tourbo-limoneux. On y observe une toute autre régularité dans la répartition de la glace en profondeur. On y trouve aussi une grande quantité de glace qui dans tout le profil atteint une profondeur considérable. Elle forme de minces couches interstitielles horizontales (de plusieurs mm) qui souvent, conjointement avec de semblables veines fines verticales, forment un fin réseau ou une structure de glace à réseau fin (photo 1).

Les particularités signalées de la structure des couches congelées du second type montrent que l'accumulation de dépôts alluviens ou autres était simultanée (syngénétique) — ou presque — à leur congélation et au gisement constant et peu profond du pergélisol dans l'épaisseur des dépôts qui s'accumulent toutefois à cette condition que la migration limitée des eaux se passât uniquement dans les bornes de la couche active peu épaisse.

Ce second type de structure des couches perpétuellement gelées est reflété par le processus de l'accumulation de dépôts se produisant simultanément avec la congélation. Ce processus détermine la possibilité du développement d'un tel complexe lithologique original qu'est la glace fossile des fissures, épaisse, très fréquente en Asie et en Amérique du Nord. C'est pourquoi les dépôts alluviaux et lacustres originaux des terrasses inondées (limons tourbeux et autres) et se distinguant par une structure à réseau fin, renferment souvent de la glace

fossile provenant des fissures (photo 2). Dans de pareilles formations qui composent les hautes et les basses terrasses au-dessus des terrains inondables ainsi que les terrasses inondables, on trouve habituellement des systèmes polygonaux massifs formés des veines perpendiculaires à elles-mêmes. Ces veines sont formées de la glace provenant des fissures et atteignent parfois plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur (jusqu'à 50—70 m).

Par suite de la disposition polygonale du système de veines de glace, le sol qui possède une structure de glace à réseau fin, forme des blocs isolés l'un de l'autre par ces veines de glace. On rencontre quelquefois dans l'alluvion gelée la glace fossile qui provient des fissures et forme plusieurs couches.

L'épaisseur de la glace des fissures dépend directement de l'épaisseur adéquate des dépôts des terrains inondables par suite de la simultanéité (syngénétique) de l'accumulation des dépôts et de la formation de la glace (6, 7). Comme nous le savons, les masses principales d'épaisseur glace fossile au Nord de l'Eurasie et de l'Amérique sont le résultat de la formation de la glace par fissuration synchronique à l'accumulation des dépôts.

Les couches gelées du premier type (épigénétiques) sont très répandues surtout dans la partie Sud de la zone du pergélisol. Les couches du second type (syngénétiques) se trouvent principalement dans la partie Nord. Il est pourtant possible que les couches gelées des deux types soient présentes dans toute la zone du pergélisol, de même que la combinaison de types de structure mixte.

Les deux types génétiques décrits des couches perpétuellement gelées sont les plus caractéristiques pour la zone du pergélisol et les plus importantes du point de vue de l'analyse du processus du thermokarst. D'autres types génétiques des couches perpétuellement gelées ont une importance plus secondaire, quoique sous ce rapport assez essentielle. Il faut mentionner la présence de gros blocs de glace: glaciaire et morainique de certaines régions montagneuses et prémontagneuses ainsi que du névé (*Firn*) enseveli de la glace lacustre et des hydrolaccolithes. Celle-ci caractérise principalement les vallées des fleuves du Nord et est plus ou moins localisée. Il faut faire remarquer tout particulièrement une assez considérable accumulation de glace dans la constitution des hydrolaccolithes — des *boulgounnyakhs* (8). Tous les autres genres d'insertion de glace dans les roches congelées ne sont pas de grand intérêt, étant donné qu'ils ne forment pas d'accumulations de glace de quelque importance et leur fonte ne provoque pas le phénomène du thermokarst.

III

La morphologie du thermokarst dépend en grande partie de la forme du gisement de la glace fossile et des roches à glace. Le thermokarst peut être adapté aux différents types de gisement de la glace fossile, mais son adaptation aux deux principaux types génétiques des couches perpétuellement gelées, ci-dessus caractérisées, a une très grande importance. Les formes du thermokarst relativement peu profondes et se dessinant d'une façon assez inégale à la surface sont propres aux espaces qui gravitent généralement vers les limites Sud de la région du pergélisol et sur lesquels, dans l'épaisseur des roches se trouve un grillage de glace se raréfiant vers la profondeur (premier type de structure des couches gelées).

Par suite de la raréfaction des couches de glace et des veines l'incontinuité du gisement en profondeur ne provoque pas, vu sa fonte, les profondes formes thermokarstiques dans le relief.

Le thermokarst, adapté à ce genre de gisement de glace, se présente le mieux dans les limites des tourbières bosselées, étant donné que sous ces tourbières, comme nous l'avons dit, il y a le plus de glace. Sur ces tourbières les formes thermokarstiques sont les plus vastes, nettes et profondes, ce qui dépend de la concentration de la glace à proximité de la surface aussi bien à la base des buttes tourbeuses de gonflement que dans les limites du champ de buttes gazonnées tout entier.

Dépendamment du degré de congélation des horizons supérieurs du grillage qui se raréfie en profondeur, apparaissent différentes formes du thermokarst aussi bien en ce qui concerne la profondeur que l'espace. Ces formes vont: depuis les anfractuosités plates et les taches humides, les poljés et les cuvettes d'affaissement jusqu'aux vastes lacs d'effondrement et aux surfaces d'affaissement. Ce qui est très typique, c'est le rôle du façonnement des structures dans la formation tétragone des fissures due à l'action des grands froids. Ce rôle détermine dans certains cas la direction du processus du thermokarst correspondant au réseau tétragone des fissures (photo 3).

Habituellement la largeur et la longueur des formes du thermokarst qui dépendent du grillage de glace qui se raréfie, dépassent considérablement la profondeur de ces formes. En dehors des causes citées, ce fait est encore conditionné par l'extension — limite des insertions de glace dans le type donné de couches gelées jusqu'à la profondeur de 15—20 m de la surface.

Ce qui est caractéristique pour les espaces ayant une tendance vers les parties du Nord et du centre de la zone du pergélisol, ce sont les épaisseurs de roches argileuses. Celles-ci ont une structure à réseau

fin et légèrement horizontale caractéristique jusqu'à une assez grande profondeur. La structure de ces couches devient souvent compliquée par la présence d'épaisses veines de glace des fissures. Pour ces espaces les vastes et profondes formes de thermokarst sont typiques; les „alass" de Yakoutie Centrale et d'autres régions de l'Asie du Nord (1) en sont un exemple classique. Souvent ces effondrements thermokarstiques dont la formation est due au dégel de l'épaisse glace fossile, présentent de grands lacs profonds. Quelquefois la profondeur de ces lacs thermokarstiques dépasse leur largeur et leur longueur.

Au Nord, les formations thermokarstiques, liées avec le dégel de la glace fossile, sont souvent représentées par les „baydjarakhs" — buttes gazonnées ayant une forme conique ou de touffes disposées en échiquier (photo 4). Dans ce cas les enfoncements entre les buttes d'où la glace des veines a fondu, sont à vrai dire thermokarstiques.

Les *baydjarakhs* se forment dans le cas du dégel de la glace des fissures pas trop épaisse ou de dégel assez superficiel de la glace épaisse. En cas d'un profond dégel de l'épaisse glace des fissures, les blocs intérieurs fondent, la surface s'affaisse (surtout si ces blocs forment une roche contenant beaucoup de glace) ce qui ne permet pas que les *baydjarakhs* se maintiennent. C'est alors que se forment des „alass" étendus.

Les thermokarsts adaptés aux buttes des hydrolaccolithes de plusieurs années — les *boulgounnyakhs* dont la formation est due au dégel de la glace dans les noyaux de ces buttes sont représentés par des enfoncements isolés, habituellement de forme ronde et souvent remplis d'eau. Ce type de thermokarst est surtout caractéristique pour certaines régions de la partie Nord-Est de l'Eurasie.

Quant au thermokarst qui dépend de la fonte des glaciers ensevelis dans les moraines, de même que du névé (*Firn*), de la glace lacustre et de la glace des hydrolaccolithes, il faut signaler que les thermokarsts de cette origine ont un caractère très local et leur présence est épisodique.

Nous avons donc vu que l'adoucissement du climat n'est pas absolument indispensable à la formation du thermokarst. Il peut se produire même en cas de refroidissement du climat, s'il devient plus continental. Ce processus peut commencer à n'importe quel endroit où la couche active est devenue plus profonde — ce qui a provoqué la fonte de la glace — et où il y a de la glace fossile ou des roches contenant beaucoup de glace et gisant à une profondeur minime de la surface.

Contrairement à l'opinion qui existe, les conditions climatiques relativement douces ne sont pas du tout indispensables au développement du thermokarst.

Ce processus peut également suivre son cours dans des conditions climatiques assez rudes, ce qui est confirmé par la grande fréquence de ce phénomène justement dans les régions du pergélisol le plus „dur” et le développement le plus important de la glace fossile.

Ce rapport n'a pas eu pour but l'éclaircissement des problèmes se rattachant à la théorie du thermokarst et dont la connaissance aurait une importance pratique, comme il n'a pas eu la prétention de dépeindre toutes les formes variées du thermokarst existant sur les vastes espaces du pergélisol. Il s'est donné pour tâche de déterminer la place du thermokarst dans la série des phénomènes en général, d'élucider les principales conditions et les causes du thermokarst, ainsi que de trouver un lien génétique plus intime, que cela n'a été fait dans le passé, entre la base géologique des processus — formes de la glace fossile et la morphologie du thermokarst.

Bibliographie

1. Grigorev, A. A. — Ob oledenanii territorii Yakutii v tchetvertitchnyi period (Glaciation de territoire de la Yakoutie dans le Quaternaire). *Trudy Komisii po izutsh. tchetvertitchnogo Perioda*, vyp. 1, 1932.
2. Katchurin, S. P. — Instrukciya po izutcheniyu termokarsta — provalnykh i prosadotchnykh yavlenii (Instruction pour l'étude du thermokarst). *Sbornik instrukcii i programmnykh ukazanii*. Izd. Komiteta po vetchnoy merzlote, Akad. Nauk SSSR, 1938.
3. Katchurin, S. P. — Vsegda li termokarst yavlyaetsya priznakom degradacii mnogoletnei merzloty (Le thermokarst est-il toujours un symptôme de la dégradation de la „merzlota” perpétuelle). *Materyaly k osnovam utcheniya o merzlykh zonakh zemnoi kory*, vyp. 2, Akad. Nauk SSSR, 1955.
4. Kudryavcev, V. A. — Dinamika vetchnoi merzloty v bassene sredn. tetcheniya r. Selemdji (Dynamique de la „merzlota” perpétuelle du bassin du cours moyen de la rivière Sélémджа). *Trudy Komiteta po vetchnoy merzlote*, t. 8, 1939.
5. Popov, A. I. — Proiskhojdenie bugristykh torfyanikov Yeniseisko — Tazovskogo mejdurechya (Origine des buttes gazonnées de l'interfluvial Iénissei-Tazov). *Referaty nauchn. Issled. rabot za 1944*. Akad. Nauk SSSR, 1945.
6. Popov, A. I. — Ossobennosti litogeneza alluvialnykh ravnin v usloviyakh surovogo klimata (Particularités du lithogénèse des plaines alluviales dans les conditions d'un climat rigoureux). *Izvestiya Akad. Nauk SSSR*, 1953, no 2.
7. Popov, A. I. — Proiskhojdenie i razvitie mochtchnogo iskopaemogo lda (Origine et

- développement de la glace fossile épaisse). *Materyaly k osnovam utcheniya o merzlykh zonakh zemnoi kory*, vyp. 2, Akad. Nauk SSSR, 1955.
8. Sumgin, M. I. — Vetchnaya merzlota potchvy v predelakh SSSR (La „merzlota” perpétuelle du sol de l'URSS). *Izdat. Akad. Nauk SSSR*, 1937.
 9. Sumgin, M. I., Katchurin, S. P., Tolstikhin, N. I., Tumel, V. F. — Obchtcheye merzlotovedeniye (Connaissance générale de la „merzlota”). *Izdat. Akad. Nauk SSSR*, 1940.



phot. de A. I. Popov

Phot. 1. Structure à réseau fin dans le limon gelé. Bandes foncées — glace



phot. de A. P. Tirtikov

Phot. 2. Glace fossile des fissures dans le découverture de la marge. A droite de la photographie on voit les baydjarakhs — résultat de la fonte de la glace



phot. de A. I. Popov

Phot. 3. Formes du thermokarst déterminées par la dissection tétragonale de la surface



phot. de A. I. Popov

Phot. 4. Baydjarakhs