

東シベリア、ウドカン含銅砂岩鉱床の成因について

N. N. BAKUN, L. N. VOLODIN & F. P. KRENDELEV

岸本 文男 訳

東シベリア下部原生代ウドカン系の含銅砂岩は古三角洲の堆積層であり、火成岩より古期のものである。その鉱石が一次堆積成のものである証拠は、鉱化体の堆積相-層位規制、鉱石の地球化学的特徴、その複合鉱物累帯配列（岩石学的に均質な堆積物の集積時における相環境の変遷と関連した累帯配列）、同生構造と同組織および続成構造と同組織の中にある。鉱化体の地質構造支配と堆積岩支配は認められない。硫化物の深成的性質は、後生作用、すなわち弱い広域変成作用・接触変成作用・熱水変成作用によるものである。

ウドカン鉱床の地質構造の特徴、含銅砂岩層の堆積条件とひきつづく変質作用の特徴、銅鉱胎層準の銅鉱埋蔵性と鉱石の鉱物学的特徴は、すでに発表した論文（Бакун, Володин, Кренделев, 1958 ; Бакун, 1958 ; Володин, 1958 ; Кренделев, 1959 ; Кренделев, 1960）で、また М. Е. Бердичевская と А. М. Лейтес（1960^{1,2}, 1961, 1962）、В. С. Домарев と Ю. В. Богданов（1959）および В. С. Домарев（1960）の論文で報告済みである。

以上のすべての報告者が本鉱化体を一次堆積起源のものであるとしている。だが、その成因に関する結論は本鉱床の2、3の重要な特徴を論拠としているにすぎず、全体としてあらゆる問題を包含させた結果ではない。

本論文では、ウドカン鉱床が含銅砂岩の含銅砂岩層と同層準の詳しい堆積相および鉱物学-岩石学的な研究を行なうことによって得られた結果を基礎にして述べられている。なお、本鉱床の長年にわたる研究によって得られた他のあらゆるデータも使われている。

さらに本論文では、鉱化体の地質構造支配・層序支配・堆積岩支配・堆積相支配、マグマ活動と鉱化体との結びつき、周辺側岩の変質、鉱石の地球化学的特徴、鉱石生成作用の物理化学的な条件、推測できる銅の起源、その銅の移動と濃集の方法が検討されている。

1. 鉱化体の地質構造支配について

ウドカン鉱床の含銅砂岩層準は、母岩と整合してナーミンガの大規模な向斜の一構成体となっている（第1、2図）。А. А. Семихатов, Г. А. Русинов, Т. Н. Михайлова, Ю. А. Якимов, Л. А. Лешуковらの地質学者によって同向斜の翼沿いに連続的に追跡された含銅砂岩の露頭は、閉じた楕円形状の輪郭（平面）を作っている。鉱化体が翼部だけでなく、向斜内側部にも発達することは、試錐によって確認済みである。しかしこの褶曲彎曲部には、鉱化体の富銅濃集体が認められない。

一含銅砂岩層準は、それ自体の層序上の位置を保ったまま向斜褶曲の過褶曲および強い擾乱褶曲を呈する南翼に分布し、そのことは銅の鉱化作用が先褶曲期に行なわれたことを物語っている。またウドカン山脈ケメン川盆地に知られている別の含銅砂岩層準（Лейтес, 1957）は、背斜構造や向斜構造の構成にも加わっている。したがって、カザフ地方の熱水性含銅砂岩鉱床における鉱化作用の局地化の際のおもな鉱石分布規制要素の一つ（Сатпаев, 1954）と思われる背斜褶曲の彎曲軸部にも翼部にも鉱化体が胚胎されていることは、ウドカン鉱床の場合を、また別のウドカン山脈の含銅砂岩層準の場合を特徴づけるものとはならない。

断裂構造と鉱化作用との結びつきは認められない。最大の転位断裂^{注1)}は構造運動帯に分

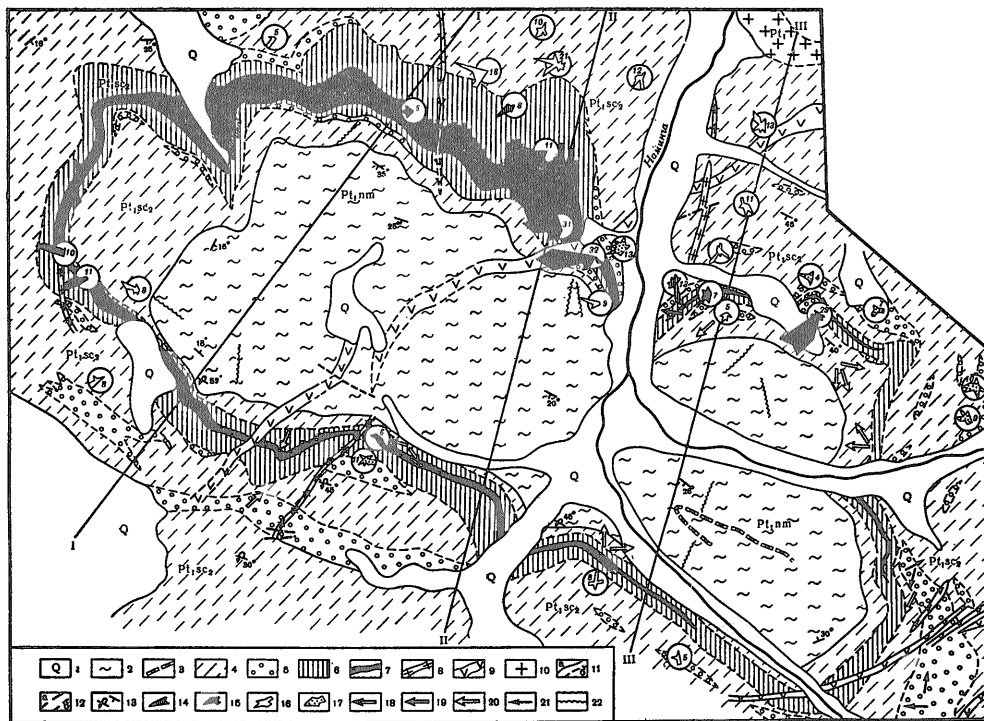
注1) разрывное нарушение

布し、そこに斑斨岩-輝緑岩岩脈が形成され、かつそれに沿って河谷や泉が生じている (Kренделев, 1960)。調査・研究の結果は、その構造運動帯に接した含銅砂岩層準の区域に鉱化体の富銅濃集体が存在しないことを示している。とくにこのことを証明しているのは、転位断裂と斑斨岩-輝緑岩岩脈がもっとも広く発達した鉱床南東部において含銅砂岩層準中に可採鉱化体がほとんど存在しないという事実である。

本鉱床に交叉鉱体が賦存しないことも、一つの特徴である。硫化銅鉱物を随半した、含銅砂岩層準中に広く分布している石英および方解石の細脈は、硫化銅鉱物がいちじるしく鉱染した砂岩層部分外には一般に入っていないし、また含銅砂岩層準外に賦存することもごくまれである。

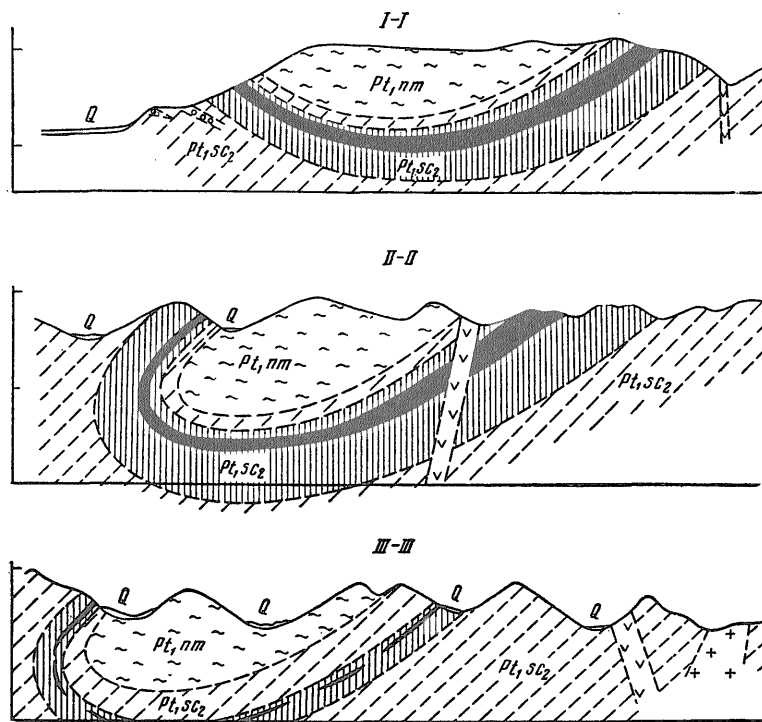
熱水性鉱石沈殿時にみられる遮蔽効果に適した条件がなかったことも、強調しておかねばならない。ナーミング果層の被変成シルト岩・千枚岩層で構成された遮蔽体となり得る岩層と含銅砂岩層準との間に厚い(100mから 250m) 鉱体上盤砂岩部層が分布し、その堆積岩相の特徴は鉱層と鉱体下盤層に酷似する。

以上現有の資料は、ウドカン鉱床の銅鉱化作用が地質構造条件に支配されていないことを示している。



第1図 ウドカン鉱床の模式堆積相図

1—第四系、下部原生代層の堆積生成タイプ；2~5 浅水水盆の堆積層：2—多量の流痕、流痕、乾裂を伴った浅海相、しばしば水盆沿岸部相の細層理シルト-泥質堆積物。3—水盆浅海沿岸部相の含銅鉱・細層理シルト-泥質堆積物。4—不明瞭な斜層理の水面下三角洲相の細粒砂質堆積物。5—天然重鉱物精鉱粒の縞を伴った沿岸波浪帯相の淘汰の進んだ砂質堆積物；6~7—水面上(?) 三角洲堆積層；6—流痕と乾裂を伴った泥濘原-湖(?) 相砂-泥質堆積物と河床相弱淘汰斜層理砂岩の互層。7—水面上(?) 三角洲含銅鉱堆積層。8—アブライトと花崗斑岩の岩脈。9—はんれい岩-輝緑岩とはんれい岩-閃緑岩の岩脈。10—斑状黒雲母花崗岩。11—確認境界(a)と推定境界(b)。12—構造断裂帯(確認：a、推定：b)。13—地層の走向・傾斜；14~17—斜層理の定位ダイヤグラム(数値は露頭での測定数を示す)；14—水面上(?) 三角洲砂質堆積層の場合。15—水面上(?) 三角洲含銅砂質堆積層の場合。16—水面下三角洲砂質堆積層の場合。17—沿岸波浪帯砂質堆積層の場合；18~21—砂質堆積層の斜層理定位の単独測定結果；18—水面上三角洲(?) の場合。19—水面上(?) 三角洲含銅堆積層の場合。20—水面下三角洲の場合。21—沿岸波浪帯の場合。22—流痕の定位-対称性波浪小丘の走向。



第2図 ウドカン鉱床模式堆積相断面図 第1図に示した断面線，垂直縮尺と水平縮尺の比は1：1

2. 鉱化体の層序支配について

ウドカン鉱床の含銅砂岩は，被変成暗灰色シルト岩と千枚岩を挟む灰色および淡もも色の細粒質ならびに中粒質の斜層理を示す被変成長石-石英質砂岩からなるサクカン累層上部亜累層（ウドカン系に属する）の上部1/3のところにて胚胎されている。この含銅砂岩は，前に述べたように，向斜の過褶曲南翼部を含む鉱床の拵がり全体にわたって層序上の位置を保った層準を形成している（第2図）。

含銅砂岩層準の厚さの変化傾向がサクカン累層上部亜累層の総層厚の変化と関係することは，一つの特徴である。ウドカン鉱床における鉱化体の層序支配を強めるこの特徴は，北西から南東方向の含銅サクカン累層上部亜累層の層厚の漸減と同様な方向の含銅砂岩層準の厚さの漸減と一致することに反映している。

その他の既知のウドカン山脈含銅砂岩層準は，ウドカン系のチトカダ累層，アレクサンドロフカ累層，ブツン累層，ナーミンガ累層中においても，広範囲にわたってはっきりとした層序上の位置を保ったまま，母岩と整合している。ウドカン山脈で現在知られているすべての含銅堆積層は，ウドカン系上部累層にだけ胚胎され，中部および下部の累層中には存在しない。

上に述べたことは，ウドカン系構成体としての含銅砂岩の場合，とくに，詳しく研究したウドカン鉱床の場合，鉱化体の層序支配がはっきりとあらわれていることを証明している。

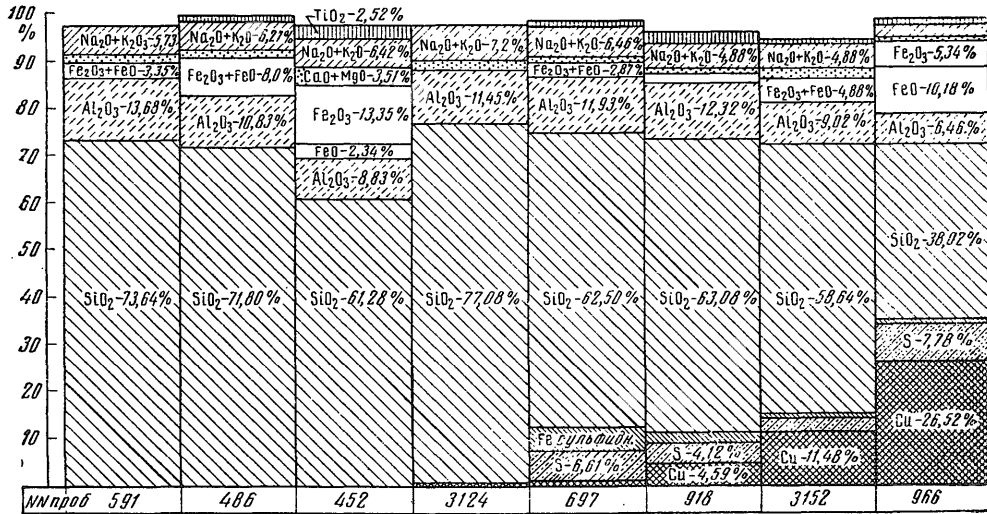
3. 鉱化体の堆積岩支配について

И. Н. Бакун (1958), М. Е. Бердичевская と А. М. Лейтес (1960_{1,2}), В. С. Домарев と Ю. В. Богданов (1959), Э. Ф. Грингаль (ウドカン地質調査・探鉱事務所^{注2)}) の研究の結果，含銅砂岩層準中における鉱化体の賦存位置は母岩層の堆積岩石記載学的^{注3)}な特徴と

注2) Удканская ГРП

注3) lithologic

第1表 ウドカン鉱床含銅砂岩層準と鉱体下盤層の砂岩の化学組成



試料概説：591—上部層鉱体下盤層産石英・長石砂岩；486—下部層産の，碎屑に富む織を伴った石英・長石砂岩；452—含銅砂岩層準産の，碎屑に富む石英・長石砂岩；3124—黄銅鉱Ⅱと黄鉄鉱Ⅱが鉱染した石英・長石砂岩；697—黄鉄鉱・黄銅鉱質鉱石（黄鉄鉱Ⅱ，黄銅鉱Ⅱ）；918—斑銅鉱・黄銅鉱質鉱石（斑銅鉱Ⅱ，黄銅鉱Ⅱ）；3152—斑銅鉱・輝銅鉱質鉱石（斑銅鉱Ⅱ，Ⅲ，輝銅鉱Ⅱ，Ⅲ）；966—斑銅鉱・輝銅鉱質鉱石（斑銅鉱Ⅲ，輝銅鉱Ⅲ）

関係ないことが確かめられている。すでに述べたように，本鉱床には鉱化体の層序支配が認められる。そのことは，含銅砂岩層準を含んだサクカン累層上部亜累層の岩石が堆積岩石記載学的な特徴からいえば同じタイプのものであるということと結びつく。

鉱体下盤層，鉱層，鉱体上盤層はほとんどが灰色細粒質の，まれには中粒質の弱被変成斜層理砂岩で構成されている。その中には，薄いレンズ状に千枚岩および弱被変成シルト岩が分布する。

上記砂岩は，その組成からいえば，アルコース砂岩に近いポリミクト質石英・長石砂岩に該当する。すなわち，同砂岩中の石英粒は砂岩を構成する碎屑物の42~60%を占め，長石の場合は20~30%，微珪岩の碎屑は5~10%，赤鉄鉱・磁鉄鉱・電気石・ジルコン・金紅石・燐灰石・珪線石・緑簾石などの碎屑は1~10%を占めている。同砂岩の特徴となっているのは，中間層中に天然淘汰による重鉱物の碎屑が濃集していることである。この砂岩およびシルト岩中には，石英・絹雲母質の膠結物が豊富である。方解石質の膠結物の分布は，それよりも少ない。

鉱体下盤層と鉱層から採取した砂岩の化学分析結果は，第1表で示したように，化学組成にはっきりとした違いがないことを教えている。含銅砂岩は銅と硫黄の含有量が高いというにすぎない。熱水性鉱化作用にもっとも適した，鉱体下盤層および鉱体上盤層中の方解石質膠結物を伴った砂岩でさえ，鉱化作用を受けていない。

上に述べたことは，熱水性鉱床の場合に特有な，鉱化作用の堆積岩支配がこの場合にはあらわれていないことを示している。

4. 鉱化体の堆積相支配^{注4)} について

ウドカン鉱床では，鉱化体の相支配が明瞭にあらわれている。鉱化作用の強さは，含銅砂岩層準を形作った堆積層の相的特徴と密接な関係をもっている。

ウドカン系上部累層群は，その生成条件によると，赤色陸源堆積層系の堆積層に類似する(Бакун, 1958; Бердичевская и Лейтес, 1960₂)。

注4) facies control

本鉱床地区に認められるサクカン累層上部亜累層とナーミンガ累層には、4種の堆積相コンプレックス (facies complex of sediments) が発達する。第1の堆積相コンプレックス—大規模な水流の三角洲縁部堆積物—は、含銅砂岩層準を含んだサクカン累層上部亜累層の柱状断面の上部1/3のところに発達する。巨大なレンズ状層として分布する多層構成のこの層は、多くの示徴からみて河床堆積層の斜層理に似た斜層理を有する灰色砂岩のレンズ状部層に分けられる (Ботвинкина, 1962)。

部層中の斜層理の定位 (orientation) が一定していることは、一つの特徴である。斜層理の一次定位のローズ・ダイヤグラムでは、測定値分布域が通常70~90°の扇形範囲外に出ない。そして、測定値群は一つの明瞭な極大値を作る。

部層の上部には、あまり明瞭でない水平層理、小さな斜層理と波状層理、堆積物のスランプ構造、漣痕、流痕、乾裂を有する一次性シルト・泥質堆積層のレンズ状層 (厚さ2~3m程度) が存在することが多く、これはおそらく湖沼-洪涵地型の相の堆積物であろう。

この堆積相コンプレックスの堆積層の厚さは、北から南および南西に向かって減少する (第1, 2図)。そして北部では、その厚さが1,000mに達している。この部分では、砂岩中に、硫化銅鉱物を分散・鉱染した礫岩間層が分布する。また本鉱床の東部では (第1図)、含銅三角洲堆積層は近海相コンプレックス堆積層 (浅水海岸帯) に相的に置きかえられているが、それは可採性の銅鉱化体をもたらしていない。

第2の堆積相コンプレックス—これは、第1の相コンプレックスの堆積層を下盤とし、またそれをおおった三角洲浅海部の堆積部である。これは大規模な緩傾斜の (不鮮明なことが多い) 斜層理を有する単調な灰色の細粒質砂岩で、その特徴はこれが三角洲成であることを示している。短い断面間隔の中でさえ斜層理のはっきりした定位がないことは、この場合の1つの特徴である。ローズ・ダイヤグラムでは、100—120°の扇形内で定位が一般に幾らか散らばった極大を示す。この相コンプレックスの堆積層は銅鉱化作用のいかなる徴候とも無縁である。

第3の相コンプレックス—これは、沿岸-浅水堆積層 (浅水-海浜帯) である。すなわち、この相コンプレックスは水面上の三角洲堆積層の走向方向に相変化し、水面下の三角洲堆積層中にレンズ状層と間層を形作っている。そして、この相コンプレックスは碎屑粒の分級度と円磨度が高いという特徴をもった赤色の斜層理にとむ砂岩からなる。これには、天然の重鉱物淘汰物 (磁鉄鉱、赤鉄鉱、ジルコン、金紅石、電気石など) の碎屑が多く集積している。この天然の淘汰重精鉱は薄層 (縞) を形成し、砂岩の層理を浮き出させている。斜層理に一定の定位がみられないことが特色である。隣合った斜層理系では、斜層理がさまざまな違った方向を呈することが多い。ローズ・ダイヤグラム上において、この斜層理の定位は一般にいろいろな方向のある程度同じ値の極大を示す。

この相タイプの堆積層を特徴づけているのは、いちじるしく分散した銅鉱化体が存在することだけである。その三角洲成の堆積層が海岸成の、鉱石賦存量が急激に変化する堆積層に変わることは、露頭と本鉱床の南東部における探鉱坑道によって追跡・調査され、明らかとなっている (第1図)。この部分では、厚い含銅砂岩層準は河床性斜層理砂岩である薄い含銅レンズ状層の系に細かく分かれ、それは浅水海浜帯という生成環境を証明する成層構造と高い碎屑淘汰度をもった無銅砂岩中に賦存する (漣痕によって形作られた斜層理と波状層理は、天然淘汰による重鉱物精鉱の濃集した縞で浮き出されている)。

第4の相コンプレックス—これは、ナーミンガ累層を構成する浅水水盆の、ときには乾涸水盆の堆積層である。これは、細かな周期の水平層理、波状漣痕 (波成漣痕)、十字状漣痕 (流成漣痕) を有する一次シルト-泥-砂質堆積物の層である。ときには、乾裂および虫跡が認められる。本鉱床の南東部では、この相コンプレックスの堆積層中に走向方向に安定した含銅シルト岩層が分布する。

各種の鉱物学的タイプを有するその鉱石は、変成作用を受けたことにかかわらず、主とし

て、三角洲堆積層の特定の相に限定された産状を呈する。黄鉄鉱-黄銅鉱質鉱化体と斑銅鉱-黄銅鉱質鉱化体は河床堆積部の堆積層に特有のものであり、水流が強い条件下で集積したものである。この堆積層は、礫岩-角礫岩間層を挟在した細粒および中粒質の粗斜層理砂岩からなる。斑銅鉱-輝銅鉱質鉱化体と輝銅鉱質鉱化体は、比較的流れの緩やかな条件下で形成された河床堆積相の堆積層中に胚胎されている。後者は、緩傾斜で薄い、あるいは不明瞭な斜層理を有する細粒質の砂岩（河に近い洲の堆積層）である。斑銅鉱-輝銅鉱質鉱化体と輝銅鉱質鉱化体は、千枚岩と被変成シルト岩の互層からなる氾濫原-湖成相の堆積層中にも胚胎されている。P. H. Володин は、各種の相タイプの堆積層の複雑な互層と含銅砂岩層準中の各種鉱物タイプの鉱石の複雑な互層とが密接な関係を有すること（鉱物の累帯配列）を確認した。

上記のように、特定の相タイプの堆積層に鉱化体が胚胎されることとその鉱物の累帯配列は、ウドカン鉱床に鉱化作用の相支配が広く行なわれていることを示している。

5. 鉱化体の可能マグマ源について

ウドカン鉱床地区には、ウドカン系の含銅堆積層群を切り、それに変成作用を与えた火成岩が広く発達している。そのため、当然のことながら、鉱化体が熱水起源のものではないかという推論がなされている。銅鉱化作用をもたらした源の一つとして、本地区のもっとも古期の火成岩類—はんれい岩-紫蘇輝石はんれい岩とはんれい岩-輝緑岩岩脈を狙上へのせることができる（カラール灰長岩コンプレックス；Салоп, 1958）。

A. П. Лебедев によって行なわれた（Бердичевская, Лейтес, 1960₁）チネヤ貫入岩類のはんれい岩-紫蘇輝石はんれい岩中における銅鉱化作用の鉱徴の研究結果は、大量の堆積岩捕獲岩を有する部分に銅鉱化体が胚胎され、ウドカン系の母岩からの銅の同化作用と関係あることを物語っている。この結論は、ウドカン系の堆積岩中の銅鉱化体が本地域の最古期のマグマ岩よりもさらに古期のものであることを示している。

はんれい岩-輝緑岩岩脈中では、少量の硫化銅鉱物（試料の破碎粉末中で確認された）がそれと交差する含銅砂岩層準の部分にだけ認められる。探鉱坑道中で Э. Ф. Гринталь（グリンターリ）が行なったはんれい岩-輝緑岩岩脈の試料分析結果は銅品位が岩脈の接触帯に較べて中央部で急激に下がっていることを示し、このことはその岩脈に切られている含銅砂岩から銅が同化されたことを明らかにしている。そのほか、はんれい岩-輝緑岩との接触部では含銅砂岩の変成現象が認められ、それは斑銅鉱を交代した二次黄銅鉱の局所的な出現となっている。この現象は、おそらく、接触帯における加熱作用と関係するものであろう。

本鉱床地区には、上記のはんれい岩-紫蘇輝石はんれい岩よりも若いチュイスク-コダール・コンプレックスの花崗岩が広く発達している（Салоп, 1958）。この花崗岩はんれい岩-紫蘇輝石はんれい岩も含銅砂岩も切っていて、変成作用を与えている。すなわち、銅鉱化作用よりも新期のものなのである。花崗岩や花崗岩と密接な関係をもった熱水性石英脈中のわずかな銅鉱化作用のあらわれも、母岩からの同生作用による生成物である。

比較的若い火成岩—薄い岩脈を形作り、下部原生代末に生じたはんれい岩-輝緑岩、微閃緑岩、閃緑斑岩、中生代マグマ作用と関係ある石英斑岩と閃緑斑岩（Салоп, 1958）—は、含銅砂岩層準との交差部にだけ銅鉱化作用の示徴を含んでいる（Кренделев, 1960）。半定量分光分析データによると、ウドカン鉱床地区の堆積岩、マグマ岩、熱水性脈産の硫化銅鉱物の場合も、含銅堆積層の場合も、同じ微量元素を有することが特徴的である（第2表）。この特徴は、鉱化作用がどのような火成岩コンプレックスとも地球化学的結びつきもっていないことを証明している。

以上のように、火成岩が広く発達しているにもかかわらず、鉱化作用とマグマ作用との結びつきは認められない。鉱化体は、火成岩よりも古期のものである。

第2表 ウドカン鉱床の含銅砂岩と母岩の微量元素

元 素		Cu	Co	Ni	Ag	Pb	Zn	Mo	Sn	Zr	Ti	Ba	Ga	V	Mn	Cr	Be	Bi	
試 料	母 岩																		
	海法の悪い砂岩																		
	磁鉄鉱で浮き出された層理を有する海法のよい砂岩																		
岩	シルト岩																		
	礫-角礫岩																		
	銅硫化鉱物を随伴した海法の悪い砂岩																		
含 銅 砂 岩	硫化銅鉱物を随伴し、磁鉄鉱で浮き出された層理を有する海法のよい砂岩																		
	硫化銅鉱物を鉱染したシルト岩																		
	硫化銅鉱物を随伴した礫-角礫岩																		
	塊状鉱																		

元素含有量 (%) : 1—1以上, 2—1~0.1, 3—0.1~0.01, 4—0.01~0.001, 5—痕跡
 ЦНИГРИ 分光研究室で分析, それぞれ, 5 試料の分析結果の平均

6. 含銅砂岩の鉱体周辺の変質について

ウドカン系の含銅砂岩など含銅砂岩は後生変質作用を受け、局地的な弱い変成を示している。この変質作用は堆積岩の一次構造の特徴をわずかに変え、一次粘土鉱物を白雲石・石英・緑泥石・緑簾石の微鱗片状集合に再結晶させ、炭酸塩鉱物の強い再結晶作用をもたらし、石英・斜長石・電気石・磁鉄鉱などの碎屑粒を再生させている。同様な弱い変質岩は本鉱床地区中央部に発達し、鉱体上盤層にそれが多く、部分的には含銅層と鉱体下盤層にも認められる。

本地区周縁部で貫入岩との接触部に接する地帯では、鉱体下盤層と部分的に含銅層と鉱体上盤層の岩石は接触変成作用を受けてホルンフェルスおよび黒雲母を随伴したホルンフェルス化砂岩に変わっている。この帯では、強い後マグマ性熱水変成作用—微斜長石化作用、曹長石化作用、緑簾石化作用、珪化作用が働いている (Бакун, 1958)。

熱水変質作用は鉱体下盤層中の本地区周縁帯にもっとも強く働いている。含銅砂岩層準中においては、その岩石は、すでに述べたように、鉱体上盤層および下盤層の岩石と差異がなく鉱体周辺の変質と呼ぶことができるようないかなる特別な変質作用の現象も認められない。

7. 鉱石の地球化学的特徴

異なる鉱床の含銅砂岩中における微量成分組成は、明らかに異なっている (第3表)。これは主として、アンチモン、砒素、ビスマス、バリウム、クロム、カドミウム、ゲルマニウムといった微量成分に関していえることである。含銅砂岩中の銅に常に伴われている元素は、鉛、銀、バナジウムであり、多くの含銅砂岩鉱床の場合にはコバルト、ニッケル、モリブデン、錫、チタン、ストロンチウム、バリウムである。そこで、一般に承認された堆積成の含銅砂岩か、あるいは成因が詳らかでない含銅砂岩かを特徴づける微量元素は存在していないことを指摘しなくてはならない。

ここに掲げているダイアグラム (第3表) で明らかなように、含銅硫化鉄鉱床および銅脈の鉱石は含銅砂岩鉱石に較べて鉛、亜鉛、砒素、アンチモンの含有量がいちじるしく多い点を特徴とする。これらの鉱石に比較して、斑岩銅鉱床の鉱石の場合はモリブデン含有量が高い点で異なっている。もっとも大きな相違点は、分散元素—セレン、テルル、インジウム、カドミウム、ゲルマニウム—の含有量にある。ウドカン鉱床の鉱石および鉱物では、分散元素 (セレン、テルル、インジウム、カドミウム、ゲルマニウム) は化学分析と分光分析によってみても、實際上認められない。セレンとテルルに関しては、このことが Н. Д. Синдеева の研究で

第 3 表 ほかのタイプの含銅砂岩と銅鉱床の鉱石中の微量成分

分析法	鉱床のタイプ			含銅砂岩							含銅硫化鉄鉱床		斑銅鉱床	銅鉱床
	元素	ウドカン	ジェスカズガン	マンガイシユラ	北ローデシア	アリウラル	ドンバス	アンバサール-テール-カクカ	レナ群	シバイ	イフ	デス	コウラード	カファン
半定量分光分析	亜鉛													
	金銀													
	砒素													
	チモ													
	リッ													
	コバ													
	タング													
	パナジ													
	イカ													
	ベリ													
	パスト													
	化学分析	セレン												
テイル														
イカ														
ゲル														
レー														

元素含有量(%) : 1-1以上, 2-1~0.1, 3-0.1~0.01, 4-0.01~0.001, 5-痕跡: ЦНИГРИ 分光研究室分析.

一タでも証明されている。

内生銅鉱床においてそのおもな随伴元素となっているのは2価の鉄であることが、また含銅砂岩の場合には3価の鉄であることが明らかにされている (Гудалин, 1947)。この特徴は外生条件下で鉄が酸化されたことを示し、ジェスカズガン鉱床が堆積成のものであることを証明する要素の一つとなっている。ウドカン鉱床の鉱石は、2価の鉄の含有品位がいちじるしく低いことを特徴としている (第4表)。2価の鉄の含有品位が低いために、ウドカン鉱床の鉱石の主要鉱石鉱物を構成しているのは斑銅鉱と輝銅鉱であり、内生銅鉱床の多くのものと違って、主要鉱石鉱物は黄銅鉱でない。

Л. Н. Гриненко が行なったウドカン鉱床産鉱石の黄銅鉱と黄鉄鉱中の硫黄同位元素組成の測定結果は、外生硫化鉱物に特徴的な軽い方の硫黄同位元素が卓越することを示している (第5表)。

上記のことから、ウドカン鉱床の鉱石は地球化学的な特徴によってみても内生の含銅硫化鉄

第 4 表 各種の成因の銅鉱床の Fe²⁺:Cu の特徴

鉱床のタイプ	Fe ²⁺ :Cu	備 考
含銅硫化鉄鉱床	16 : 1	Г.Г. Гудалин による
ジェスカズガン鉱床の含銅砂岩	0.37 : 1	同上
ウドカン鉱床の含銅砂岩	0.08 : 1	5 試料の分析の平均

第 5 表 ウドカン鉱床産黄銅鉱と黄鉄鉱の硫黄同位元素組成

鉱 物	S ³² /S ³⁴
黄 銅 鉱	22.38
黄 鉄 鉱	22.36

鉱石，斑銅鉱石，銅脈鉱石と類似する点がないとしなくてはならない。このことはウドカン鉱床の含銅砂岩がそれらとは別の，おそらく一次堆積成のものであることを想わせる。

8. 鉱石の物理化学的生成条件について

ウドカン鉱床の含銅砂岩は，構造と組織の性質および鉱物組成によると，内生鉱床の鉱石との類似性を有する。この類似性は，ウドカン鉱床の鉱石中に変晶組織と変粒状組織，それに斑状，微脈-鉱染状，微脈状の各構造が広く発達することに現われている。変晶組織のうち，地質温度計として大きな関心をもたれているのは，きわめて広く分布する，斑銅鉱中の黄銅鉱の固溶体離組織——鉱物生成温度が 270°C以下でないことを証明する葉片状，格子状，エムルジョン，網状の各組織である（Филимонов, 1952）。そのほか，本鉱床の鉱石を構成する六面体の輝銅鉱，斑銅鉱，黄銅鉱，輝水鉛鉱は，内生鉱床に特有の鉱物である。

ウドカン鉱床の含銅砂岩産黄鉄鉱は次のような物理的性質を特徴とする。すなわち，その反射能はR%で54.3~57.1，微硬度は 898~1,410 kg/mm²，モースの硬度で 6.8~ 7.8，結晶の熱起電力は 0.18~0.23 mV/grad. である。

В. Г. Круглова が研究した別種の鉱床の黄鉄鉱の物理的性質と比較してみると，ウドカン鉱床産鉱石の黄鉄鉱の物理的性質は含銅硫化鉄鉱床と熱水性銅鉱床産の黄鉄鉱の性質と同様であり，堆積性銅鉱床産黄鉄鉱の性質と異なることを示している。

それと同時に，熱水鉱床という観点と結びつき難い一連の特徴が認められる。すなわち，石英と微珪岩の碎屑中に黄銅鉱と斑銅鉱の微粒が鉱染しているのに，その碎屑粒をとりまく膠結物中には銅鉱物が存在していない。また，礫岩-角礫岩中に，千枚岩および彼変成シルト岩に変わった一次泥岩-シルトの角ばった碎屑と円磨された碎屑中に，微細に分散した硫化銅鉱物（黄銅鉱，斑銅鉱，輝銅鉱）の鉱染体を認めることが多い。同様な含銅礫と硫化銅鉱物の鉱染した碎屑粒の存在は，一次堆積層中に銅鉱体が賦存する指標となるようである。

そのほか，磁鉄鉱，チタン鉄鉱，緑簾石の結晶が成長する際に取り込んだ一次泥質膠結物の部分に微小な丸い輝銅鉱，斑銅鉱，黄銅鉱が存在する。同様な硫化銅鉱物の分離体は含銅砂岩膠結物中の微小な球様の結核として西プリアール地方やドネツ河流域炭田地方に認められており，堆積-続成生成物と考えられている（Сарнаева, 1958）。

また，ウドカン鉱床の含銅砂岩中には，一次堆積構造をひきついでものと思われる構造も認められる。そのような構造に該当するのが縞状（おそらく，成層構造をひきついでのものであろう），鉱染状，膠結状の各構造である。硫化銅鉱物の分離体が堆積岩の構造の細かな部分を書き出しているのである。含銅層準中の斜層理砂岩では，その斜層理が硫化銅鉱物に富んだ縞で浮き出されていることが多い。またその硫化銅鉱物は，若干の斜層理砂岩系中では，その斜層理を削った縞の形でも，整合した縞の形でも分布している。さらにこの硫化銅鉱物は，漣痕と流痕の小さな丘の間にある小さな凹みに集積し，また一次泥質堆積物中の乾裂を充填した砂岩中にも濃集している。

以上のように，ウドカン鉱床の鉱石は普通の深成的様相を有すると同時に，堆積成の鉱石が示すような示徴も併せもっている。黄鉄鉱および黄銅鉱に較べて斑銅鉱と輝銅鉱が鉱石構成鉱物の大部分を占めることは鉱化作用時に比較的酸素の割合が高い条件であったことを示し，そのことは鉱化体が外生のものでと推定したとよく一致している。

鉱石の鉱物学的タイプが組合った複雑な配列状況は，鉱石生成時における酸化-還元条件の気まぐれな変化を物語っている。だが，含銅砂岩層準が分布する近海陸生堆積岩の堆積岩石学的に均質な部層のような均質な媒体中における酸化-還元条件の鋭くかつ複雑な変化を予期することは難しい。したがって，本鉱床で認められる鉱物の累帯配列を，熱水溶液から鉱石鉱物が沈殿したためと説明することはきわめて困難である。同時に，三角洲区域における堆積作用の場合の非常に大きな特徴は，酸化-還元条件の交錯にある。硫化銅鉱物の深成的様相は物理

化学的条件の変化, 主として, 後生的な変質作用, 広域変成作用, マグマ岩の作用による接触作用に起因した温度と圧力の変化の反映と考えるのが当然であり, 熱水溶液からの沈殿によるものと考えないのが自然である。

9. 銅の起源, その運搬と濃集の仕方について

堆積鉱床の場合, 本質的には, 含銅堆積岩の碎屑物を送りこんだ隣接する水食地区が該当金属の源とされる。その金属は分散状態で含まれているか, さもなければ露頭および鉱床の形で存在している。多くの場合, 堆積岩中への金属の濃集作用は火山活動と密接な関係をもっている。ウドカン系柱状断面上部の岩石中には火山活動の証跡がないので, 火山活動との関係は認めるべきでない。

Л. И. Салоп (1958), М. Е. Бердичевская および А. М. Лейтес (1962), Н. Н. Бакун (1958) の研究によって, ウドカン系の近海陸生層は本鉱床地区の北方および北東方に位置したアルダン楕状地, チャラ地塊, スタノヴォイ山脈の始生代岩石の水食によってもたらされたことが明らかになった。これらの地域に銅の源を求めるときである。

ウドカン系柱状断面上部の堆積層中における碎屑物の組成は, その源として, もっとも可能性が大きいのがアルダン楕状地西部および中央部に発達した始生代イエングラ系の岩石であり, 部分的にはチャラ地塊とスタノヴォイ山脈の始生代岩石であることを教えている。イエングラ系の岩石は, 珪岩, 結晶片岩, ざくろ石片麻岩, 珪線石片麻岩からなる (Сердюченкоら, 1960)。岩石の組成中には磁鉄鉱, 赤鉄鉱, チタン鉄鉱が多く, それがウドカン系の砂岩の重鉱物を構成している (チトカング累層, アレクサンドロフカ累層, プツン累層, サクカン累層)。サクカン累層砂岩中には, 副成鉱物としてジルコン, 燐灰石, 電気石, 金紅石, スフェーン, 緑簾石が認められる。これらの鉱物は, イエングラ系の始生代岩石中にも存在する。フェドロフスク累層 (イエングラ系上部) には, 磁鉄鉱-赤鉄鉱鉱床が胚胎されている。

その鉄鉱石中に硫化鉄鉱物と硫化銅鉱物が存在すること, そして輝水鉛鉱が存在することにも, 大きな関心もたれている (Сердюченкоら, 1960)。硫化鉄鉱物—黄鉄鉱と磁硫鉄鉱—はフェドロフスク累層中に賦存するすべての磁鉄鉱-赤鉄鉱鉱床の鉱体および母岩中に存在し, 岩石ないし鉱石総量の1~3%を占めている。ある鉱体では, 硫化鉄鉱物の含有量が15%に達している。分光分析によって, その黄鉄鉱および磁硫鉄鉱中に銅, チタン, コバルト, ニッケル, モリブデン, パナジウム, ガリウムが認められた。銅は, 主として黄鉄鉱中に含有されている。鉛, 亜鉛, 銀のような元素は分光分析によっても黄鉄鉱や磁硫鉄鉱中に認められない。

硫化銅鉱物は黄銅鉱, 斑銅鉱, 銅藍, 輝銅鉱からなり, 自然銅, 孔雀石, 藍銅鉱, 珪孔雀石も産出する。これらの鉱物は, 鉄鉱石中にも, その母岩中にも存在する。黄銅鉱と斑銅鉱は顕微鏡的な分離体として硫化鉄鉱物に伴われ, 一次鉱物であることを示している。他の銅鉱物は, 先カンブリア紀の風化殻形成時における一次硫化銅物の表成酸化作用によって生じたものである (Сердюченкоら, 1960)。

この磁鉄鉱試料中の銅品位は痕跡程度から1/160%程度までの幅があり, さらに先カンブリア紀風化帯 (マータイト鉱石) 中では1~2%から4%に, ある場合には10%に達している。イエングラ系の2, 3の鉄鉱床では, 銅量がきわめて少ない。

輝水鉛鉱は多くのこの鉄鉱床の鉄鉱石と母岩中に認められている。また, これは始生代アラスカイト質花崗岩中の石英-長石細脈の構成物として産出する。鉄鉱石および母岩中には, 微量成分として, コバルト, クロム, チタンも認められる。ニッケルがごく少量含有されていることも強調されている (Сердюченкоら, 1960)。

ウドカン鉱床の鉱石とアルダン楕状地の鉄鉱石の組成を比較した結果は, それらが地球化学的にある程度類似性をもっていることを物語っている。特徴的なことは, 含銅砂岩中に磁鉄鉱が多いことである。ウドカン鉱床産鉄鉱石中の銅の随伴元素のうちでは, モリブデン, コバル

ト，バナジン，クロムが注目される。この含銅砂岩中に賦存するモリブデンは堆積物として銅と一緒に沈殿したと思われる。アルダン楯状地の鉄鉱石の場合と同じように，ウドカン鉱床の鉱石中にはニッケルが少なく，鉛と亜鉛がほとんど存在していない。

したがって，ウドカン鉱床およびウドカン山脈のその他含銅層準の含銅砂岩の場合の銅の源となったのは，アルダン楯状地始生代の含銅岩石と銅鉱であると考えられる。砂岩中の銅の起源が崩壊作用を受けた岩石中に分散していた銅であり，銅の高品位濃集体であり，さらに鉱床にはかならなかつた，という仮定は，ウドカン鉱床やその他のウドカン山脈の類似タイプの鉱床に認められる明瞭な鉱化体の層序支配現象にうまく当てはまる。

本鉱床の銅鉱の沈殿は，おそらく水食地区において大規模な銅の集積体が崩壊して，堆積物の集積地域に大量のその銅を供給した時代に行なわれたものと思われる。

ウドカン鉱床の厚い鉱層の層準は，大規模な流水の水面上にある三角洲端部の堆積層で形成されている（Braun, 1958）。鉱床の崩壊によって分離した銅が河川網に入り，三角洲に運ばれたと推定することのできるあらゆる根拠がある。銅の運搬形態に関する問題は，より若い地質時代の含銅砂岩鉱床の場合でさえ未解決である。

銅が硫酸塩として酸性溶液中に溶解状態で存在し得ることは，いうまでもない。A. Д. Архангельский と E. В. Рожкова の実験（1932）も，M. A. Яковлева の実験（1952）も，現世の表成条件下では pH が 6.3 以上になると，銅の硫酸塩は難溶性化合物—炭酸塩もしくは塩基性硫酸塩—に変わるので，溶液中に長時間存在し得ないことを示している。これら難溶性銅化合物の粒子は河水によって，おもに懸濁物として近海陸生物質と一緒に運搬される（Страхов, 1961）。

ウドカン鉱床の含銅砂岩の成因を検討するとき，銅の運搬は，M. H. Яковлева が述べた炭酸塩もしくは塩基性硫酸塩の懸濁物という方法で行なわれたものと推定されている（Бакун, Володин, Кренделев, 1958）。この銅化合物は大部分の懸濁沈殿物と一緒に三角洲に沈殿し，そのため三角洲に銅の高い濃集作用が認められる。沿岸条件下での水の強い動きと運搬された物質の淘汰によって，銅化合物が分散したわけである。

先カンブリア紀の気圏と水の CO₂ 濃度が高く，河水と海水の pH 値が低い（Страхов, 1961）ために，溶解状態で大量の銅が遠く離れた所まで運ばれることができ得たと考えられる。銅鉱床が酸化される際に生じた酸性硫酸銅溶液〔アルダン楯状地の銅露頭に先カンブリア紀の酸化帯が存在することを直接の証拠とする（Сердюченко ら, 1960）〕は現在よりもはるかに緩やかなテンポの中性化作用を受け，その結果，その大部分の銅は溶液のまま河川に流れこみ，うまく下流にまで達し，その三角洲に溶液から，おそらく炭酸塩ないし塩基性硫酸塩の形でその銅の大部分が沈殿し，ごく少部分の銅だけが水盆に運び去られるにすぎない。以上のことによって，本鉱床に認められる鉱化作用の明瞭な相支配が説明される。銅の若干の部分は，石英および微珪岩碎屑中に包有された硫化銅鉱物として，機械的な方法で運搬されている。

続成作用によってこの堆積物中の諸成分が大きく配列しなおされ（Страхов, 1961），他の成分が貧化するによって銅分がさらに濃集する。本鉱床における鉱化体の配列が不均質であることは，おそらく，続成作用によって銅が配列しなおされたことによるものであろう。

ウドカン鉱床の成因

以上に述べたように，ウドカン鉱床では明瞭な鉱化作用の層序支配と堆積相支配が認められる。しかし，鉱化作用の構造支配と堆積岩支配はあらわれていない。そして，マグマ岩と鉱化作用との結びつきは認められない。反対に，銅鉱化体はすべてのマグマ岩より古期であることを物語っている。側岩の鉱体周辺の変質は認められない。

以上すべての特徴は，砂岩中の銅鉱化作用が一次堆積成のものであることを物語っている。その銅の源は，アルダン楯状地始生代イエングラ系堆積層中の銅鉱床および銅露頭であろう。

銅は、おそらく、真正溶液および懸濁物の形で運搬されたものと思われる。鉱体の形成には、多分、銅の運搬と沈殿のほかにも、大きな役割を果しているのが続成作用による銅の再配列である。本鉱石が一次堆積成のものであることは、その地球化学的な特徴と同生および続成生成物の残留体 (含銅砕屑粒, 含銅粘土礫, 鉱石構造の特徴, など) によって証明できる。鉱化作用の深成的様相は、後生作用, すなわち、広域変成作用, 接触変成作用, 後マグマ成変成作用の下で鉱石構成物質が再編成されたことに原因している。

文 献

- Архангельский, А. Д. & Рожкова, Е. В. (1932) : Об условиях накопления меди в осадочных породах (堆積岩中における銅の集積条件について) ; Бюл. Моск. о-ва испыт. природы. Отд. геол., т. 10(2).
- Бакун, Н. Н. (1958) : Условия образования и вторичные изменения осадочных пород Удоканского месторождения медистых песчаников (ウドカン含銅砂岩鉱床堆積岩の形成条件と二次変質) : Изв. Высш. учебн. завед. Геология и разведка, No. 11.
- Бакун, Н. Н., et al. (1958) : Основные особенности геологического строения Удоканского месторождения медистых песчаников и направление его дальнейшей разведки (ウドカン含銅砂岩鉱床の地質構造の基本的特徴とその今後の探査方向) : Изв. Высш. учебн. завед. Геология и разведка, No. 5.
- Бердичевская, М. Е. & Лейтес, А. М. (1960₁) : Меденосность восточной части Удоканского хребта (ウドカン山脈東部の銅鉱埋蔵性) : Разведка и охрана недр, No. 1.
- Бердичевская, М. Е. & Лейтес, А. М. (1960₂) : Некоторые особенности строения пластовых месторождений меди на примере медистых песчаников Восточной Сибири (東シベリア地方含銅砂岩を例とした層状銅鉱床の構造の幾つかの特徴) : Междунар. конгр. по седиментологии. докл. сов. геологов к VI Междунар. конгр. по седиментологии. Москва.
- Бердичевская, М. Е. & Лейтес, А. М. (1961) : Геолого-петрографическая характеристика протерзойских меденосных осадочных толщ в северной части Читинской области. (チタ州北部原生代含銅堆積岩層の地質学的-岩石学的特徴) ; В сб. "Очерки по металлогении осадочных пород". Изд. АН СССР.
- Бердичевская, М. Е. & Лейтес, А. М. (1962) : Некоторые особенности пространственного размещения типов парод удоканской серии (ウドカン系岩石タイプの立体的配列の幾つかの特徴) : В сб. "Очерки по металлогении осадочных и осадочно-метаморфических пород." Изд. АН СССР.
- Ботвинкина, Л. Н. (1962) : Слоистость осадочных пород : (堆積岩の層理) : Тр. Геол. ин-та. АН СССР, вып. 59.
- Володин, Р. Н. (1958) : Молибденит в рудах Удоканского месторождения медистых песчаников (ウドカン含銅砂岩鉱床産鉱石中の輝水鉛鉱) : Изв. Высш. учебн. завед. Геология и разведка, No. 11.
- Гудалин, Г. Г. (1947) : Вопросы геологии и генезиса Джекказгана (ジェスカズガン鉱床の地質と成因の諸問題) : Горный ж., No. 9.
- Домарев, В. С. (1960) : Первичная зональность оруденения в месторождениях медистых песчаников (含銅砂岩鉱床における鉱化作用の一次累帯配列) : В кн. "Междунар. геол. конгр., XXI сес. Докл. сов. геологов. Пробл. зо" Изд. АН

СССР.

- Домарев, В. С. & Богданов, Ю. В. (1959) : О зональности орудеенения в медистых песчаниках Удоканского месторождения (ウドカン鉱床含銅砂岩中の鉱化体の累帯配列について) : Геология рудн. месторожд., No. 1.注5)
- Кренделев, Ф. П. (1959) : О рудности медистых песчаников Удоканского месторождения и методике его разведки (ウドカン鉱床含銅砂岩の鉱石埋蔵性とその探查法について) : Изв. Высш. учебн. завед. Геология и разведка, No. 2.
- Кренделев, Ф. П. (1960) : учет геоморфологических особенностей при промышленной оценке месторождений медистых песчаников (含銅砂岩鉱床の企業診断時における地態の特徴の算定) : Изв. Высш. учебн. завед. Геология и разведка, No. 1
- Лейтес, А. М. (1957) : О меденосности удоканской серии Средне-Витимской горной страны (中部ヴィチム山岳区ウドカン系の銅鉱埋蔵性について) : Бюл. НТГО Читинского геол. упр., No. 4.
- Салоп, Л. И. (1958) : Протерозой Байкальской горной области (Байкал山岳区の原生代層) : в сб. "Геологическое строение СССР" (ВСЕГЕИ), т. 1.
- Сатпаев, К. И. (1954) : О некоторых специфических особенностях геологии медистых песчаников Атбасар-Терсакканского района (Атбасар-Терсаккан区含銅砂岩の地質の幾つかの特徴について) : Изв. АН Каз ССР, No. 134, сер. геол., вып. 18.
- Сатпаев, Т. А. (1958) : Минералогические особенности месторождений медистых песчаников (含銅砂岩鉱床の鉱物学的特徴) : Изд. АН Каз ССР.
- Сердюченко, Д. П., et al. (1960) : Железные руды Южной Якутии (南ヤクート地方の鉄鉱) : Изд. АН СССР, СОПС.
- Страхов, Н. М. (1961) : Основы теории литогенеза (堆積岩成因論の基礎) : Изд. АН СССР.
- Филимонова, А. А. (1952) : Опыты по Нагреванию борнитсодержащих колчеданных руд (含斑銅鉱硫化鉄鉱石の加熱実験) : Изд. АН СССР, сер. геол., No. 3.
- Яковлева, М. Н. (1952) : Экспериментальные исследования к вопросу накопления меди в осадочных породах (堆積岩中における銅の集積問題に関する実験的研究) : Бюл. Моск. о-ва, испыт. природы, Отд. геол., т. 26(6).

注5) 第22巻第2号に掲載済み