



ӨОЖ 528.854.2, 528.88, 553.430
FTAXP 89.57.35, 38.17.17, 38.57.17
DOI 10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.98(2).84

Серикбаева Э.Б., Талгарбаева Д.Н., Гаипова А.Б.

ЖШС Ионосфера институты, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: Seikbayeva@gmail.com

ASTER ЖЕРСЕРІКТІК ҚАШЫҚТАН ЗОНДТАУ ДЕРЕКТЕРІН МЫС-ПОРФИРЛІ КЕН ОРЫНДАРЫН БАРЛАУДА ҚОЛДАНУ

Андатпа. Қазақстанның оңтүстік-шығысында орналасқан Қолдар массивіндегі гидротермиялық өзгерістерді картаға түсіру үшін кеңейтілген жылу сәулелену және шағылысу радиометрінің (ASTER) деректері талданды. Порфирлі мыс кенорындары кен денелерінің өзінен ауданы жағынан айтарлықтай үлкен, гидротермиялық өзгерген тау жыныстарының кең аймақтарымен бірге жүреді, бұл оларды спутниктік суреттерде анық көруге мүмкіндік береді. Мыстың порфирлік минералдану моделіне сәйкес типтік гидротермиялық өзгерістер минералды жиынтығы анықталды және қашықтықтан зондтау моделі үшін негіз ретінде пайдаланылды.

Деректерді талдау үшін аргиллит және пропилит аймақтарына тән минералдарды анықтауға мүмкіндік беретін спектрлік бұрыштық карта (SAM) және арна математикалық операциялары қолданылды. жолақтарының салыстырмалы жұтылу тереңдігі және VNIR (көрінетін және жақын инфрақызыл) және SWIR (қысқа толқынды инфрақызыл) спектрлік диапазондарды біріктірудің қарапайым әдістері тау жыныстарының литологиялық құрамы туралы ақпарат алуға мүмкіндік берді.

Талдау нәтижелері жер бедерінің құрылымдық ерекшеліктері минералданумен тығыз байланысты зерттелетін аймақтағы белгілі мыс кен орындарымен жақсы корреляцияны көрсетті. ASTER деректері далалық тексерумен үйлескенде порфирлі шөгінділердегі өзгеру аймақтарын сипаттауда тиімді екені дәлелденді. VNIR және SWIR спектрлік жолақтары бір кен орнындағы аргиллит, пропилит және ферриттену өзгерістерін тиімді ажыратуға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: Қолдар массиві; гидротермиялық альтерация; ASTER; порфирді мыстың минералдануы; кескінді өңдеу әдістері.

Kipicne

Қашықтықтан зондтау (ҚЗ) геологиялық зерттеулерде маңызды рөл атқарады, тиімді картаға түсіруге, кен орындарын болжауға және геологиялық процестерді талдауға мүмкіндік береді. Ғарыштық және әуе платформаларынан алынған мультиспектрлік деректер литологиялық вариацияларды, өзгеру аймақтарын және потенциалды минералдануды көрсететін аномальды спектрлік сипаттамалары бар аумақтарды анықтай алады. Қашықтықтан зондтау әдістері әсіресе дәстүрлі далалық зерттеулер қиын болатын жету қиын және кең аумақтарды зерттеу кезінде сұранысқа ие. Қашықтықтан зондтау деректерін геохимиялық, геофизикалық және петрофизикалық әдістермен біріктіру пайдалы қазбалардың таралуының дәлірек үлгілерін жасауға және геологиялық барлау тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді [1,2].

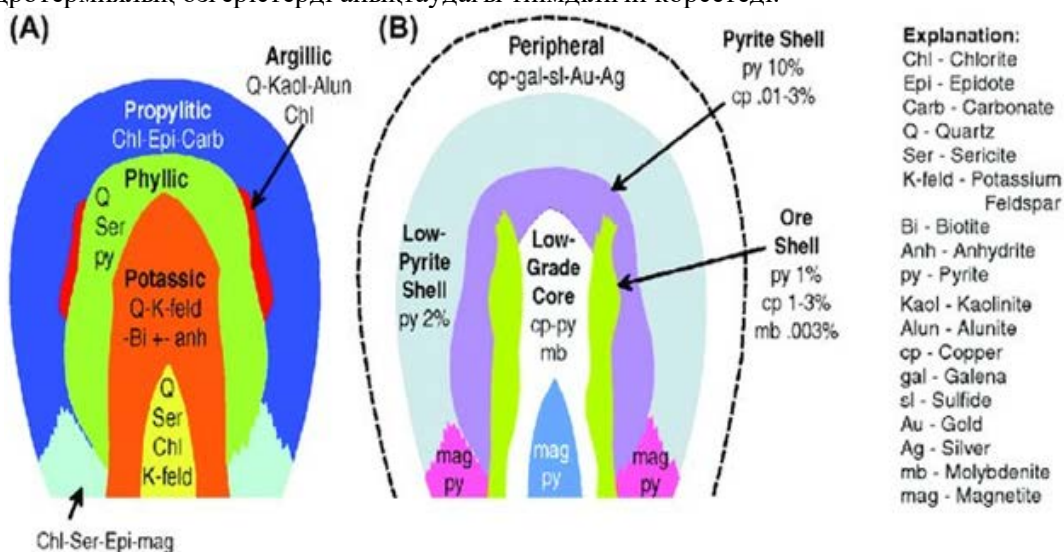
1970 жылдардан бастап қашықтықтан зондтау деректері минералдану туралы ақпаратты алудың жылдам және тиімді құралына айналды. Геологиялық барлауға арналған ең танымал спутниктік сенсорлардың бірі 1999 жылы Terra жерсерігінің бортында



ұшырылған ASTER (кеңейтілген ғарыштық термиялық сәуле шығару және шағылысу радиометрі) болып табылады. ASTER сенсоры кенді аймақтарға тән тау жыныстары мен минералдарды анықтауға мүмкіндік беретін көрінетін, жақын, орта инфрақызыл (SWIR) және термиялық инфрақызыл (TIR) диапазондарын қамтитын 14 спектрлік арнасының арқасында ерекше құнды [3].

SWIR диапазоны (1,6–2,4 мкм) порфирлі мыс және сирек металдар кен орындарымен байланысты серициттенген, аргилденген және пропилиттенген аймақтар сияқты гидротермиялық өзгерген тау жыныстарын картаға түсіру үшін қолданылады. TIR каналдары (8,1–11,3 мкм) тау жыныстарын олардың температурасы мен эмиссиялық сипаттамаларына байланысты саралауға мүмкіндік береді, бұл әсіресе кварцты, дала шпаттарын және карбонаттарды анықтау үшін пайдалы. Геохимиялық деректермен үйлескенде ASTER талдауы құрылымдық және минералогиялық факторлармен бақыланатын перспективалы аймақтарды локализациялауға көмектеседі.

Қазақстанда ASTER қолдану, оның ішінде сирек металдардың минералдануын болжау үшін оның вольфрам, молибден және порфир мыс кен орындарымен байланысты гидротермиялық өзгерістерді анықтаудағы тиімділігін көрсетеді.



1 - сурет – Порфирлі мыс кен орнымен байланысты гидротермиялық альтерация аймақтары (Lowell & Guilbert 1970 нұсқасынан өзгертілген). (A) Пропилиттік, филлиттік, аргилді және калийлі альтерация аймақтарынан тұратын минералды альтерация аймақтарының схемалық қимасы. (B) Әрбір альтерация аймағына байланысты кендердің схемалық көлденең қимасы [4].

Порфирлі мыс (Cu) кен орындары магмалық процестерден пайда болатын жоғары температуралы гидротермиялық сұйықтықтардан түзілген сульфидті минералдардың тамырлы торларымен сипатталады. Калий мен сутегімен байытылған бұл сұйықтықтар айтарлықтай минералогиялық өзгерістер тудырады. Идеал порфирді Cu шөгінділері әдетте әртүрлі альтерация аймақтарымен, соның ішінде калийлік, филлиттік және пропилиттік аймақтармен байланысты (1-сурет) [5-6]. Өзгеріс минералдары электромагниттік спектрдің әртүрлі аймақтарында, соның ішінде көрінетін және жақын инфрақызыл (VNIR), қысқа толқынды инфрақызыл (SWIR) және термиялық инфрақызыл (TIR) сияқты спектрлік жұтылу үлгілерін көрсетеді. Бұл диагностикалық қасиеттер оларды қашықтықтан зондау деректері арқылы анықтауға және картаға түсіруге мүмкіндік береді [7-10].



ТМ және ЕТМ+ сенсорларынан айырмашылығы, ASTER минералогиялық талдау үшін критикалық диапазондағы спектрлік арналардың жеткілікті санына ие (1-кесте). Мысалы, пропилиттік аймақта құрамында Mg-OH бар минералдар (мысалы, эпидот, хлорит және ибит) ASTER 8 жолағына сәйкес келетін 2,30 мкм-де сіңуін көрсетеді. Бұл ASTER-ді порфирлі мыс кендерінің минералдануын зерттеу үшін ерекше пайдалы құрал етеді.

1 - Кесте – ASTER жер серігінің сипаттамасы

Сипаттама	ASTER
Түсірілім күні	30/05/2004
Кеңістіктік ажыратымдылығы	15 м (VNIR), 30 м (SWIR), 90 м (TIR)
Спектрлік жолақтар	14 (3 VNIR, 6 SWIR, 5 TIR)
Негізгі қолданылатын мақсаты	Аймақтану, гидротермальды зоналарды картаға түсіру, литологиялық картаға түсіру
Минералдарды идентификациялаудың дәлдігі	Орташа
Қолдану аумағы	Орта және үлкен ауқымды зерттеулер

Сонымен қатар, зерттелетін аумақтың күрделі топографиясы шығындарды айтарлықтай арттырады және дәстүрлі дала жұмыстарының тиімділігін төмендетеді. Осыған байланысты далалық зерттеулерді жүргізу алдында қашықтықтан зондау әдістерін қолдану қосымша ақпарат алуға және келешегі бар аймақтарды анықтауға мүмкіндік береді, бұл кейінгі геологиялық барлау процесінің тиімділігін айтарлықтай арттырады.

Зерттеу аумағы

Ақтоғай-Айдарлы кен орындары тобы Шығыс Қазақстан облысы, Аягөз ауданында, Ақтоғай теміржол станциясынан шығысқа қарай 25 км қашықтықта орналасқан. Ақтоғай мен Айдарлы кен орындарының арақашықтығы шамамен **3 км**. Аймақтың климаты **қоңыржай континенттік**, жазы ыстық, қысы суық. Жер бедері **төбелі жазық**, биіктігі **400-600 метр** аралығында, ал өсімдіктер жамылғысы **жартылай шөлейтті** болып келеді.

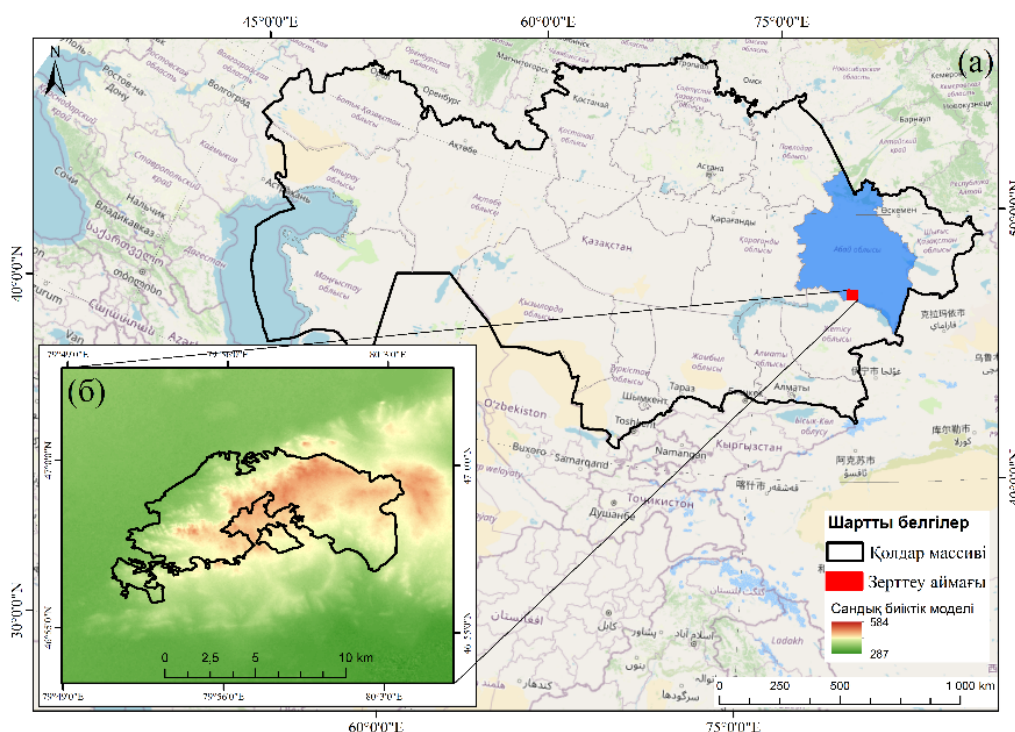
Геологиялық тұрғыдан бұл кен орындары **Балқаш-Жезқазған қатпарлы белдеуімен** байланысты. Өңірде **тұрақты су көздері жоқ**, судың негізгі көзі маусымдық өзендер мен жер асты сулары болып табылады. Өсімдіктер жамылғысы **сирек**, негізінен **дала және жартылай шөлейт өсімдіктері** – бетеге, жусан және сексеуіл кездеседі [11].

Геологиялық тұрғыдан Ақтоғай, Айдарлы және Қызылқия — кеш палеозой дәуіріндегі гранитоидты интрузиялармен байланысты ірі медно-порфирлі кен орындары. Аймақтың негізгі жыныстары гранодиориттер, кварц диориттері, сондай-ақ жанартаутекті-шөгінді жыныстар, соның ішінде туфтар, туфты құмтастар және сланецтер.

Ақтоғай — Қазақстандағы ең ірі кен орындарының бірі, оның мыс қоры 4,5 миллион тоннадан астам, орташа мыс құрамы 0,34%. Айдарлы кен орнында да айтарлықтай қорлар бар, оның жалпы руда көлемі 1,53 миллиард тонна, орташа мыс құрамы 0,38%, сондай-ақ алтын (14 т), күміс (2,2 мың т) және молибден (155 мың т) қоры анықталған [11].



Екі кен орнында да рудалық денелер гранитоидты интрузиялардың орталық бөліктерінде шоғырланған және тамырлар, линзалар мен жарықшақтық аймақтар түрінде кездеседі. Бұл рудалы денелер медно-молибденді минералдармен байытылған. Бастапқы рудалы минералдарға халькопирит, борнит, молибденит және пирит жатады. Қосалқы минералдар қатарында галенит, сфалерит және магнетит кездеседі. Серициттену, пропилиттену, альбиттену және кварциттену сияқты метасоматикалық өзгерістер кең таралған, бұл өңірде күшті гидротермалық белсенділік болғанын көрсетеді [12,13].



2 - сурет - Қызығушылық аймағының орналасуына шолу; (a) ArcMap базалық карталарынан алынған зерттеу аймағының және оған жақын аймақтардың аймақтық географиялық орны, (b) NASA-ның Earth Explorer бағдарламасынан жүктелген DEM-SRTM 1Arc-Second нұсқасынан алынған зерттеу аймағының төбеге негізделген рельефі.

Бұл кен орындары Қазақстанның металлургиялық өнеркәсібінің дамуында стратегиялық рөл атқарады. Олардың географиялық қолжетімділігі мен мол қоры мыс, молибден және басқа да қосалқы элементтерді ұзақ мерзімді игеру үшін перспективалы етеді. Алайда экологиялық аспектілерді ескеру және қоршаған ортаға әсерді азайту үшін заманауи технологияларды енгізу маңызды.

Материалдар және әдістер

Қашықтықтан зондтау деректерін пайдалану үшін кескіндерді алдын ала өңдеу, оның ішінде геометриялық және радиометриялық түзету, деректерді дайындау және олардың ақпараттық мазмұнын арттыру қажет. Түпнұсқа спутниктік суреттерде геометриялық және радиометриялық бұрмалануларға байланысты қателер жиі кездеседі. Біріншісі объектілердің кеңістіктік орналасуындағы ауытқуларға қатысты болса, екіншісі датчиктердің әсерінен, күн радиациясының спектрлік сипаттамаларынан және атмосфералық әсерлерден туындайды [14]. Бұл зерттеу 2004 жылдың 30 тамызында түсірілген, геометриялық және радиометриялық түзетуден өткен ASTER Level-1T (L1T)

өңделген кескіндерді пайдаланады. Сонымен қатар, атмосфералық әсерлерді жою үшін псевдорефлекторлық кескінді жасауға мүмкіндік беретін лог-қалдық әдісі қолданылады. Бұл әдіс күн радиациясының, атмосфераның мөлдірлігінің, сенсорлық сипаттамаларының, топографиялық әсерлердің және альбедо әсерлерінің орнын толтырып, бейнені шағылыстыру тұрғысынан шынайырақ етеді. Логарифмдік қалдықты түзету процедурасы спектрлік және кеңістіктік геометриялық ортаны пайдаланып кіріс спектрін қалыпқа келтіруден тұрады. Геометриялық ортаны таңдау оның беріліс әсерлерін және басқа мультипликативті бұрмалануларды есепке алу қабілетіне байланысты. Есептер пиксель мәндерінің логарифмі арқылы орындалады.

Спектрлік геометриялық орташа мән барлық спектрлік арналар бойынша әрбір пиксель үшін есептеледі және күн радиациясының, атмосфераның мөлдірлігінің және сенсордың сипаттамаларының әсерін түзетіп, әрбір арнадағы барлық пикселдер бойынша кеңістіктік геометриялық орташа мән есептеледі. Тұтастай алғанда, бұл алдын ала өңдеу әдісі минералды спектрлік сипаттамаларды дәлірек алуға мүмкіндік беретін жарықтық деректерінің сапасын айтарлықтай жақсарттады. Сыртқы бұрмалауларды жою нәтижесінде алынған кескіннің сенімділігін арттырады, одан әрі спектрлік талдауды жеңілдетеді. Спектрлік ерекшелікті жақсарту және қызығушылықтың потенциалды аймақтарын анықтау үшін кескінді өңдеу әдістерінің жинағы пайдаланылды: белгілі бір спектрлік мүмкіндіктерді және біріктірілген жолақ қатынасын ерекшелеу үшін жолақ қатынасы (BandRatio) талдауы. Порфирлі мыс кен орындарындағы гидротермиялық аймақтарды анықтау үшін қашықтықтан зондтауда жолақ қатынасы (BandRatio) әдісі кеңінен қолданылады. Бұл кен орындары пайдалы қазбалардың аймақтық таралуымен сипатталады: орталық калий аймағы (кварц, калий дала шпаты) сазды минералдармен, хлоритпен, каолинитпен және ортоклазбен байытылған аргиллит, пропицит және филлит аймақтарымен қоршалған.

Spectral Angle Mapper (SAM) әдісі пиксельдің спектрлік векторы мен анықтамалық спектр арасындағы бұрышты өлшеу арқылы ASTER деректерінен минералдарды анықтау үшін қолданылады. Бұл әдіс спектрлік қисық пішінін талдауға негізделген, бұл оны жарық жағдайларындағы өзгерістерге төзімді етеді. ASTER (14 канал) үшін Spectral Angle Mapper (SAM) хлорит, серицит және каолинит сияқты гидротермальды аймақтардың аймақтық картасын жасау үшін қолданылады [15]. Анықтамалық спектрлер, спектрлік кітапханалардан (мысалы, USGS) немесе өріс деректерінен алынады. Нәтиже – геологиялық барлау үшін аса маңызды минералогиялық тақырыптық карта. Spectral Angle Mapper (SAM) әдісі спектрлік айырмашылықтарды анықтау қабілетіне байланысты порфирлі мыс пен сирек металдардың минералдануымен байланысты аймақтарды ажыратуда әсіресе тиімді.

Сандық кескінді өңдеу және спектрлік талдау процедуралары ENVI 5.3 нұсқасында орындалды, ал нәтижелерді визуализациялау және интерпретациялау ArcGIS Pro бағдарламасында зерттелетін аумақтың геологиялық картасымен үйлесімде жүзеге асырылды. Бұл тәсіл қашықтықтан зондтау деректерін талдау нәтижелерін белгілі геологиялық ақпаратпен салыстыруға мүмкіндік берді, осылайша интерпретацияның сенімділігін арттырды.

Нәтижелер

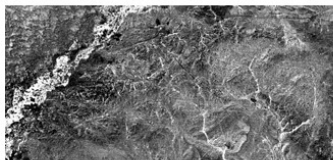
Жолақ коэффициенттері (Band Ratios) қолданылды, ASTER олардың бірегей спектрлік сипаттамалары негізінде әртүрлі жер үсті минералдарын талдау үшін қолданылды. Жолақ математикасының артықшылықтары оның күші мен қарапайымдылығын, минералогиялық өзгерістерді және басқа геологиялық ерекшеліктерді тиімді анықтау және картаға түсіру қабілетін қамтиды. Бұл әдіс әртүрлі материалдардың спектрлік сипаттамаларының айырмашылығын есепке алуға мүмкіндік

береді (2-кесте), бұл оны геологиялық картаға түсіру үшін қашықтықтан зондтау саласындағы маңызды құрал етеді (3-4-сурет).

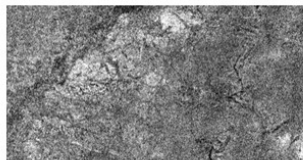
2 - Кесте – Мыспен байланысты гидротермиялық үгілу аймағының индикаторлық минералдары үшін жалпы жолақ коэффициенттері

Минералдар	ASTER диапазонының комбинациясы
Госсан	B4/B2
Оксид железа	B4/B3
Каолинит	B7/B5
Серицит- Мусковит	(B7+B5)/B6
Аргиллит	B4/B6
Хлорит - Эпидот	(B7+B9)/B8
Кальцит	(B6+B7)/(2*B8)

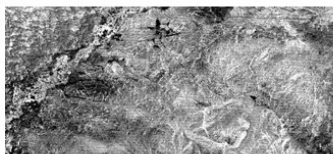
Госсан



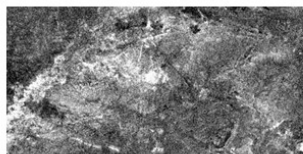
Серицит
Мусковит



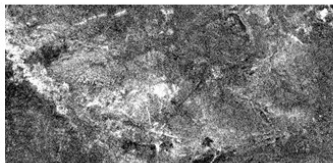
Темір оксиді



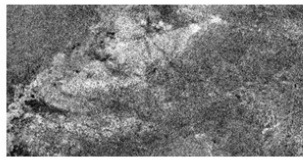
Кальцит



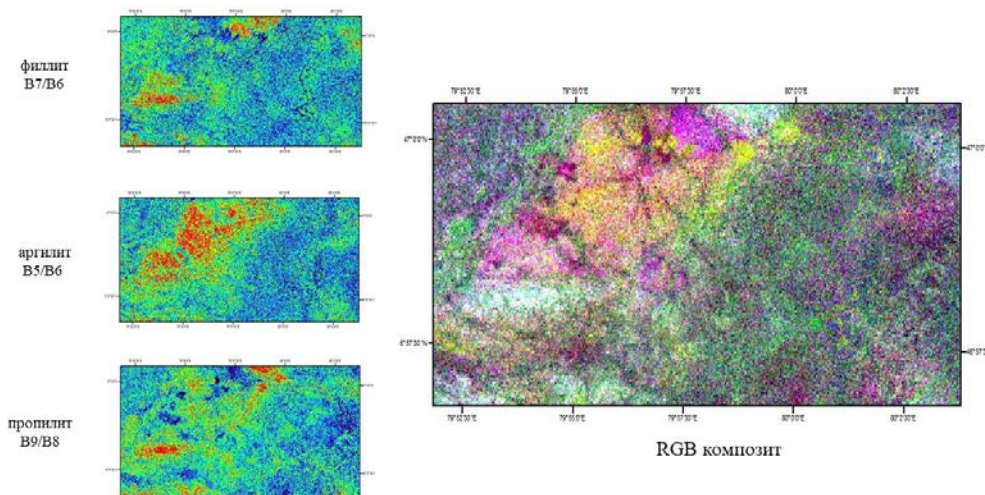
Каолинит



Хлорит-
Эпидот

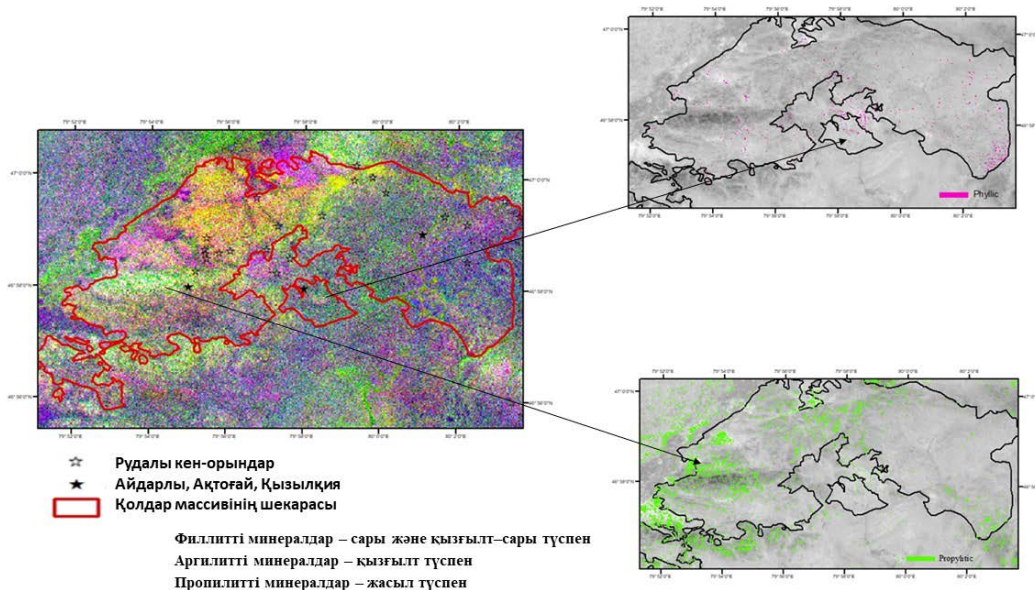


3- сурет – Қолдар массиві аймағындағы ASTER деректері негізінде жолақ математикасы бойынша алынған индикаторлық минералдар.



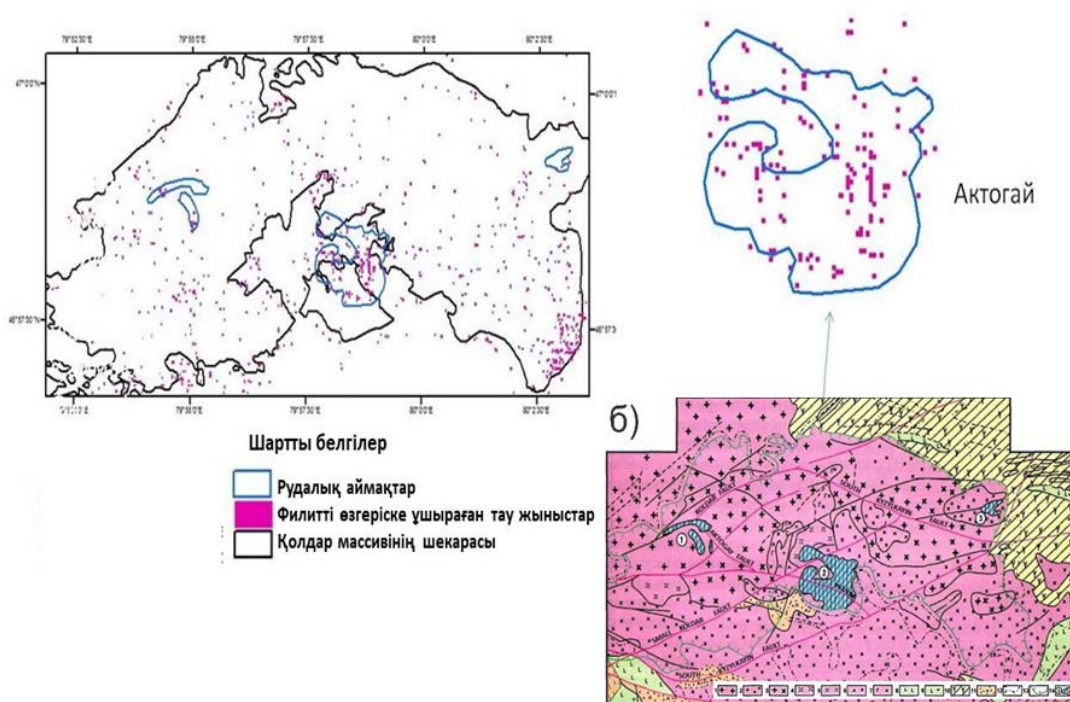
4 - сурет – ASTER деректерінен алынған RGB түсті композициядағы зерттеу аймағындағы гидротермиялық өзгерістердің нәтижелік бейнесі.

Филлиттік альтерация аймақтарын талдау үшін спектрлік бұрышты өлшегіш Spectral Angle Mapper (SAM) әдісін қолдану зерттелетін аумақтың кенді аймақтарымен айтарлықтай корреляцияны көрсетті. Spectral Angle Mapper (SAM) анықтаған филлиттік өзгерістер Ақтоғай кен орнында тіркелді (6-сурет), мұнда пайдалы қазбалардың жоғары концентрациясы байқалады, бұл аймақтардың геологиялық құрылымдармен және кен түзілу процестерімен ықтимал байланысын көрсетеді. Бұл нәтижелер геологиялық маңызды аумақтарды анықтаудағы Spectral Angle Mapper (SAM) әдісінің тиімділігін растайды, оның одан әрі барлау және кен ресурстарын бағалау үшін маңыздылығын көрсетеді. [16]



5 - сурет – Өртүрлі әдістерді қолдану арқылы алынған нәтижелерді салыстыру
Band math және Spectral Angle Mapper (SAM)

Зерттеу аймағындағы пропилиттердің және филлиттердің өзгерістерін анықтау үшін жолақты математика әдісі және спектрлік талдау әдісі Spectral Angle Mapper (SAM) көмегімен алынған нәтижелердің салыстырмалы талдауы екі әдісті де қолданғанда пропилиттердің өзгерістері бір-бірімен жақсы корреляцияланатынын көрсетті (5-сурет). Бұл пропилиттік өзгерістердің химиялық құрамы мен құрылымындағы өзгерістерді анықтауда диапазондық математика Spectral Angle Mapper (SAM) да тиімді екенін растайды.



6 - сурет – SAM (Spectral angle mapper) нәтижесін зерттеу аймағының геологиялық картасымен салыстыру [17].

Пропилиттерден айырмашылығы, Spectral Angle Mapper (SAM) әдісімен анықталған филлиттердің өзгерістері жолақты математика әдісімен салыстырғанда айтарлықтай азырақ болды.

1 - орташа түйіршікті граниттер; 2 - микрозернисті граниттер, гранит-порфирлер; 3 - гранодиориттер, кварцты диориттер; 4 - пегматиттік құрылымы бар ұсақ дәнді диориттер; 5 - монзониттер; 6 - құрамында кварц бар порфирлі диориттер; 7 - габбродиориттер; 8 - базальтты порфириттер; 9 - андезит-базальт порфириттері; 10 - қышқыл құрамның вулканогенді-шөгінді қалыңдықтары; 11 - дацитті порфирлер; 12 - магниттік қасиеттері бойынша бөлінген жыныстардың шекаралары; 13 - Колдар интрузивінің жер бетіне шығуының сыртқы шекарасы; 14 - кен аймақтары: 1 - Айдарлы, 2 - Ақтоғай, 3 - Қызылқия.

Филлиттік альтерация аймақтарын талдау үшін спектрлік талдау әдісін Spectral Angle Mapper (SAM) қолдану зерттелетін аумақтағы кен аймақтарымен айтарлықтай корреляцияны анықтады. Spectral Angle Mapper (SAM) анықтаған филлиттік өзгерістер



пайдалы қазбалардың жоғары концентрациясы бар Ақтоғай кен орындарында табылды (6-сурет), бұл олардың тау-кен-геологиялық құрылымдармен және процестермен потенциалды байланысын көрсетеді. Бұл нәтижелер геологиялық маңызды аймақтарды анықтаудағы Spectral Angle Mapper (SAM) әдісінің тиімділігін және оның зерттелетін аумақта одан әрі геологиялық барлау және кен ресурстарын бағалау үшін маңыздылығын көрсетеді.

Нәтижелерді талдау

Порфирлі мыс (Cu) кен орындары магмалық белсенділік нәтижесінде пайда болатын жоғары температуралы гидротермиялық сұйықтықтардан түзілген сульфидті минералды тамырлардың желілерімен сипатталады. Калий мен сутегіге бай бұл сұйықтықтар айтарлықтай минералогиялық өзгерістерге әкеледі. Оңтайлы порфирді Cu шөгінділері әдетте калийлік, филлиттік және пропилиттік [18-20] сияқты әртүрлі альтерация аймақтарымен байланысты.

ASTER диапазонының арақатынасын пайдалану олардың бірегей спектрлік сипаттамалары негізінде әртүрлі жер үсті минералдарын тиімді талдауға мүмкіндік берді (3-сурет). ASTER деректерінен есептелген жарықтық индекстері (BR) негізінде үш негізгі өзгерту аймағы — калийлік, пропилиттік және аргилльді — сәтті ажыратылды (Сурет 4). Математикалық жолақ әдісі өзінің күші мен қарапайымдылығын, сонымен қатар минералогиялық өзгерістер мен геологиялық ерекшеліктерді анықтаудағы жоғары дәлдікті көрсетті. Бұл тәсіл материалдардың спектрлік сипаттамаларындағы айырмашылықтарды есепке алуға мүмкіндік береді, бұл оны геологиялық карта жасау үшін қашықтықтан зондаудың маңызды құралына айналдырады.

Спектрлік бұрышты бейнелеуші Spectral Angle Mapper (SAM) әдісі кенді аймақтармен, әсіресе филлиттік өзгерістерге қатысты маңызды корреляцияны көрсетті. Ақтоғай кен орнында Spectral Angle Mapper (SAM) пайдалы қазбалардың жоғары шоғырланған аймақтарымен сәйкес келетін филлиттену аймақтарын анықтауға мүмкіндік берді (6-сурет). Бұл Spectral Angle Mapper (SAM) әдісі кен аймақтарын болжау және гидротермиялық өзгерістерді талдау үшін сенімді құрал екенін растайды.

Жолақ математикасы мен Spectral Angle Mapper (SAM) әдістерінің салыстырмалы талдауы екі әдіс те пропилиттердің өзгерістерін тиімді анықтайтынын көрсетті, бұл осы тәсілдердің сенімділігі мен қайталану мүмкіндігін көрсетеді (5-сурет). Дегенмен, филлиттер үшін жолақты математика әдісі Spectral Angle Mapper (SAM) -мен салыстырғанда айқынырақ нәтиже көрсетті, бұл әдістердің тау жыныстарының минералогиялық ерекшеліктеріне әртүрлі сезімталдығына байланысты болуы мүмкін.

Осылайша, жолақ математикасы мен спектрлік талдау әдістерін қолдану олардың кен аймақтарын геологиялық карталау және болжаудағы маңыздылығын растайды. Бұл әдістер мәліметтерді интерпретациялаудың дәлдігін жақсарту және зерттелетін аумақтағы минералогиялық өзгерістерді одан әрі зерттеу үшін жерүсті зерттеулермен бірге қолданылуы мүмкін.

Қорытынды

Математикалық диапазонды және спектрлік талдау әдістерін Spectral Angle Mapper (SAM) қолдану зерттеу аймағының гидротермиялық өзгерістері мен минералогиялық ерекшеліктерін тиімді анықтауға мүмкіндік берді. Математикалық жолақ әдісі пропилиттік аймақтарды картаға түсіруде жоғары дәлдікті көрсетті, ал Spectral Angle Mapper (SAM) кенді құрайтын аймақтармен филлиттік өзгерістердің маңызды корреляциясын анықтады, бұл оның кен орнын болжау үшін тиімділігін растады.

Өзгерген минералдардың көпшілігі кенді жыныстарда және мыс кен орындарының жанында түзіледі, бұл ASTER деректерін талдау нәтижелерімен расталады. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, порфирді мыс кен орындары, соның ішінде Ақтоғай,

калий, филлит және пропилит сияқты гидротермиялық альтерация аймақтарымен тығыз байланысты. ASTER деректерін және спектрлік талдауды кешенді пайдалану геологиялық карта жасаудың дәлдігін жақсартады және одан әрі геологиялық барлау жұмыстарын жүргізуге негіз бола алады.

Алғыстар

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды (№ BR21882179 гранты).

ӘДЕБИЕТ

- [1] Liu, C.; Qiu, C.; Wang, L.; Feng, J.; Wu, S.; Wang, Y. (2023). Application of ASTER Remote Sensing Data to Porphyry Copper Exploration in the Gondwana Region. *Minerals*, 13, 501, doi:10.3390/min13040501.
- [2] Fu, Y.; Cheng, Q.; Jing, L.; Ye, B.; Fu, H. (2023) Mineral Prospectivity Mapping of Porphyry Copper Deposits Based on Remote Sensing Imagery and Geochemical Data in the Duolong Ore District, Tibet. *Remote Sens.* 15, 439, doi:10.3390/rs15020439
- [3] Clark, R.N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *Remote Sens. earth Sci. Man. Remote Sens*
- [4] Lowell, J.D.; Guilbert, J.M. (1970) Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.* 65, 373–408, doi:10.2113/gsecongeo.65.4.373.
- [5] Ahmadi, H.; Uygucgil, H. (2021) Targeting iron prospective within the Kabul Block (SE Afghanistan) via hydrothermal alteration mapping using remote sensing techniques. *Arab. J. Geosci*, 14, doi:10.1007/s12517-020-06430-3.
- [6] Yao, F.; Xu, X.; Yang, J.; Geng, X. A Remote-Sensing-Based Alteration Zonation Model of the Duolong Porphyry Copper Ore District, Tibet. *Remote Sens.* 2021, 13, 5073, doi:10.3390/rs13245073.
- [7] Dalton, J.B.; Bove, D.J.; Mladinich, C.S.; Rockwell, B.W. (2004) Identification of spectrally similar materials using the USGS Tetracorder algorithm: the calcite–epidote–chlorite problem. *Remote Sens. Environ.* 89, 455–466, doi:10.1016/j.rse.2003.11.011.
- [8] Mars, J. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere* 2006, 2, 161, doi:10.1130/GES00044.1.
- [9] Di Tommaso, I.; Rubinstein, N. (2007) Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geol. Rev.* 32, 275–290, doi:10.1016/j.oregeorev.2006.05.004.
- [10] Hunt, G.R. (1977). SPECTRAL SIGNATURES OF PARTICULATE MINERALS IN THE VISIBLE AND NEAR INFRARED. *GEOPHYSICS*. 42, 501–513, doi:10.1190/1.1440721
- [11] Li, C.; Shen, P.; Pan, H. (2018) Mineralogy of the Aktogai giant porphyry Cu deposit in Kazakhstan: Insights into the fluid composition and oxygen fugacity evolution. *Ore Geol. Rev.* 95, 899–916, doi:10.1016/j.oregeorev.2018.03.027.
- [12] Zvezdov, V.S.; Migachev, I.F.; Girfanov, M.M. (1993) Porphyry copper deposits of the CIS and the models of their formation. *Ore Geol. Rev.* 7, 511–549, doi:10.1016/0169-1368(93)90013-O.
- [13] Li, C.; Shen, P.; Pan, H.; Cao, C.; Seitmuratova, E. (2018) Geology and ore-forming fluid evolution of the Aktogai giant porphyry Cu deposit, Kazakhstan. *J. Asian Earth Sci.* 165, 192–209, doi:10.1016/j.jseaes.2018.07.009
- [14] Ричардс, JA (2013). Сокращение признаков. В Анализ цифровых



изображений с помощью дистанционного зондирования(стр. 343–380). Springer Berlin Heidelberg

[15] Rowan, L. C., et al. (2004). "Distribution of hydrothermally altered rocks in the Cuprite mining district, Nevada, using AVIRIS data." *Remote Sensing of Environment*.

[16] Sabins F.F. (1999) Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*. 14:157–183.

[17] Калиева А. С. Оценка вещественного состава руд и вмещающих пород медного месторождения Актогай методом спектроскопии. Магистерская диссертация. – Алматы. –2021. –60 с.

[18] Ahmadi, H.; Uygucgil, H. (2021) Targeting iron prospective within the Kabul Block (SE Afghanistan) via hydrothermal alteration mapping using remote sensing techniques. *Arab. J. Geosci.* 14, doi:10.1007/s12517-020-06430-3.

[19] Yao, F.; Xu, X.; Yang, J.; Geng, X. A (2021). Remote-Sensing-Based Alteration Zonation Model of the Duolong Porphyry Copper Ore District, Tibet. *Remote Sens.* 13, 5073, doi:10.3390/rs13245073.

[20] Lowell, J.D.; Guilbert, J.M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.* 65, 373–408, doi:10.2113/gsecongeo.65.4.373.

REFERENCES

[1] Liu, C.; Qiu, C.; Wang, L.; Feng, J.; Wu, S.; Wang, Y. Application of ASTER Remote Sensing Data to Porphyry Copper Exploration in the Gondwana Region. *Minerals* 2023, 13, 501, doi:10.3390/min13040501.

[2] Fu, Y.; Cheng, Q.; Jing, L.; Ye, B.; Fu, H. Mineral Prospectivity Mapping of Porphyry Copper Deposits Based on Remote Sensing Imagery and Geochemical Data in the Duolong Ore District, Tibet. *Remote Sens.* 2023, 15, 439, doi:10.3390/rs15020439

[3] Clark, R.N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *Remote Sens. earth Sci. Man. Remote Sens*

[4] Lowell, J.D.; Guilbert, J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.* 1970, 65, 373–408, doi:10.2113/gsecongeo.65.4.373.

[5] Ahmadi, H.; Uygucgil, H. Targeting iron prospective within the Kabul Block (SE Afghanistan) via hydrothermal alteration mapping using remote sensing techniques. *Arab. J. Geosci.* 2021, 14, doi:10.1007/s12517-020-06430-3.

[6] Yao, F.; Xu, X.; Yang, J.; Geng, X. A Remote-Sensing-Based Alteration Zonation Model of the Duolong Porphyry Copper Ore District, Tibet. *Remote Sens.* 2021, 13, 5073, doi:10.3390/rs13245073.

[7] Dalton, J.B.; Bove, D.J.; Mladinich, C.S.; Rockwell, B.W. Identification of spectrally similar materials using the USGS Tetracorder algorithm: the calcite–epidote–chlorite problem. *Remote Sens. Environ.* 2004, 89, 455–466, doi:10.1016/j.rse.2003.11.011.

[8] Mars, J. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere* 2006, 2, 161, doi:10.1130/GES00044.1.

[9] Di Tommaso, I.; Rubinstein, N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geol. Rev.* 2007, 32, 275–290, doi:10.1016/j.oregeorev.2006.05.004.



- [10] Hunt, G.R. SPECTRAL SIGNATURES OF PARTICULATE MINERALS IN THE VISIBLE AND NEAR INFRARED. *GEOPHYSICS* 1977, 42, 501–513, doi:10.1190/1.1440721
- [11] Li, C.; Shen, P.; Pan, H. Mineralogy of the Aktogai giant porphyry Cu deposit in Kazakhstan: Insights into the fluid composition and oxygen fugacity evolution. *Ore Geol. Rev.* 2018, 95, 899–916, doi:10.1016/j.oregeorev.2018.03.027.
- [12] Zvezdov, V.S.; Migachev, I.F.; Girfanov, M.M. Porphyry copper deposits of the CIS and the models of their formation. *Ore Geol. Rev.* 1993, 7, 511–549, doi:10.1016/0169-1368(93)90013-O.
- [13] Li, C.; Shen, P.; Pan, H.; Cao, C.; Seitmuratova, E. Geology and ore-forming fluid evolution of the Aktogai giant porphyry Cu deposit, Kazakhstan. *J. Asian Earth Sci.* 2018, 165, 192–209, doi:10.1016/j.jseaes.2018.07.009
- [14] Richards, J. A. (2013). Feature reduction. In *Digital Image Analysis by Remote Sensing* (pp. 343–380). Springer Berlin Heidelberg
- [15] Rowan, L. C., et al. (2004). "Distribution of hydrothermally altered rocks in the Cuprite mining district, Nevada, using AVIRIS data." *Remote Sensing of Environment*.
- [16] Sabins F.F. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*. 1999;14:157–183.
- [17] Kalieva A.S. Otsenka veshchestvennogo sostava rud i vmestchayushchikh porod mednogo mestorozhdeniya Aktogay metodom spektroskopii. *Magisterskaya dissertatsiya*. – Almaty. – 2021. – 60 s. [Kalieva A.S. Assessment of the Material Composition of Ores and Host Rocks of the Aktogay Copper Deposit by Spectroscopy Method. Master's Thesis. – Almaty. – 2021. – 60 p.]. [in Russian]
- [18] Ahmadi, H.; Uygucgil, H. Targeting iron prospective within the Kabul Block (SE Afghanistan) via hydrothermal alteration mapping using remote sensing techniques. *Arab. J. Geosci.* 2021, 14, doi:10.1007/s12517-020-06430-3.
- [19] Yao, F.; Xu, X.; Yang, J.; Geng, X. A Remote-Sensing-Based Alteration Zonation Model of the Duolong Porphyry Copper Ore District, Tibet. *Remote Sens.* 2021, 13, 5073, doi:10.3390/rs13245073.
- [20] Lowell, J.D.; Guilbert, J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.* 1970, 65, 373–408, doi:10.2113/gsecongeo.65.4.373.

Серикбаева Э.Б., Талгарбаева Д.Н., Гаипова А.Б.

**ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ASTER ПРИ РАЗВЕДКЕ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Аннотация. Данные усовершенствованного термоэмиссионного и отражательного радиометра (ASTER) были проанализированы для картирования гидротермальных изменений в массиве Колдар, расположенном на юго-востоке Казахстана. Медно-порфировые месторождения сопровождаются обширными зонами гидротермально измененных пород, значительно превышающими по площади сами рудные тела, что позволяет отчетливо их выявлять на космических снимках. Была выявлена типичная ассоциация минералов гидротермальных изменений, соответствующая модели порфировой медной минерализации, которая использовалась в качестве основы для модели дистанционного зондирования.

Для анализа данных использовались спектральная угловая карта (SAM) и математические операции с каналами, что позволило идентифицировать минералы, характерные для зон аргиллита и пропилита. Относительная глубина поглощения полос и простые методы совмещения VNIR (видимого и ближнего инфракрасного) и SWIR



(коротковолнового инфракрасного) спектральных диапазонов позволили получить информацию о литологическом составе горных пород.

Результаты анализа показали хорошую корреляцию с известными месторождениями меди в исследуемой области, где структурные особенности рельефа тесно связаны с минерализацией. Данные ASTER в сочетании с полевыми обследованиями оказались эффективными для характеристики зон изменений в порфировых отложениях. Спектральные диапазоны VNIR и SWIR позволяют эффективно дифференцировать аргиллиты, пропилиты и ферритизационные изменения в пределах одного месторождения.

Ключевые слова: Колдарский массив; гидротермальные изменения; ASTER; медно-порфировая минерализация; методы обработки изображений.

Serikbayeva Elmira, Talgarbayeva Dinara, Gaipova Arailym
APPLICATION OF ASTER SATELLITE REMOTE SENSING DATA IN
EXPLORATION OF PORPHYRY COPPER DEPOSITS

Annotation. Advanced Thermal Emission and Reflectivity Radiometer (ASTER) data were analyzed to map alteration in the Koldar massif in southeastern Kazakhstan. Porphyry copper deposits are characterized by extensive alteration zones that are much larger than the ore bodies themselves, allowing them to be clearly identified in satellite imagery. A typical alteration mineral assemblage was identified, consistent with a porphyry copper mineralization model, which was used as the basis for the remote sensing model.

A spectral angle map (SAM) and channel math were used to analyze the data, allowing minerals characteristic of the mudstone and propylite zones to be identified. Relative absorption depths of the bands and simple VNIR/SWIR fusion techniques provided information on the lithological composition of the rocks. The results of the analysis showed good correlation with known copper deposits in the study area, where structural features of the relief are closely related to mineralization. ASTER data in combination with field surveys proved to be effective in characterizing alteration zones in porphyry deposits. VNIR and SWIR spectral ranges allow effective differentiation of argillites, propylites and ferritization alteration within a single deposit.

Keywords: Massif Koldar; hydrothermal alteration; ASTER; porphyry copper mineralization; image processing methods.