

کاربرد کانی شناسی شاخص سنگین در اکتشاف کانی با تاکید بر شاخص های

فلز پایه در حوزه های دگرگونی یخچالی و پلوتونیک

چکیده: مینرالوژی (کانی شناسی) شاخص برای کشف طیف وسیعی از کانی ها مورد استفاده قرار می گیرد. این روش از کانی هایی استفاده می کنند که در برای رساندن به غلظت آزمایشگاهی بسیار سنگین می باشند، رنگارنگ بوده و دارای یک سری خصوصیات شیمیایی و فیزیکی مفید هستند. کانی ها باید خاص منبع باشند. برخی از کانی ها، کانی های حقیقی مقاوم می باشند. سایرین اگرچه مقاومت کم تری دارند، در رانش های یخچالی اکسیدی پایدار بوده و بسیاری از رسوبات غیر یخچالی را شامل می شوند. برخی نیز مانند ذرات طلا، دارای اندازه سیلت می باشند ولی بیشتر آن ها دانه درشت هستند. اندازه ذرات دارای اثر زیادی بر روی الگوهای انتشار کانی شاخص در میدان های یخچالی می باشند. کانی های شاخص دانه درشت دارای دو نوع می باشند: 1-کانی های شاخص کیمبرلیت kim و 2-کانی های شاخص سولفیدی ماسیو ماگمایی و یا دگرگونی که موسوم به (Mmsim) می باشند. KIM ها غنی از منیزیم و کروم بوده و بیشتر Mmsim غنی از منیزیم، منگنز، آلومینیوم و کروم هستند. این عناصر شاخص را نمی توان به طور ژئوشیمیایی در کانی های سنگین بی شکل تشخیص داد زیرا دارای دیگر کانی های غیر شاخصی هستند که حاوی عناصر یک سازان از حیث فرم شیمیایی می باشند. کالکوپیریت نیز یک Mmsim بسیار مهم است اما برخی از دانه های باقی مانده در حوزه های انتشاری برای شناسایی توسط آنالیز های ژئوشیمیایی انتخابی بسیار کوچک هستند.

Mmsim از سه نوع رسوبات اصلی فلزی و یا زون های واکنشی و تغییر آن ها برگرفته شده است. 1- سولفید های ماسیو رسوبی آتش فشانی (حاوی زیر نمونه های آتش فشانی، سدکس و دره می سی سی پی)، در حوزه دگرگونی متوسط تا گرید بالا می باشند 2- رسوبات اسکارن و گرسینو 3- سولفید های نیکل مس ماگماتیک. انواع Mmsim مربوط به رسوبات و نهشته های سدیم مس نیز وجود دارند که نشان دهنده هیبردیزاسیون معدنی مربوط

به آزمایشیون سنگ های گوگردی با ماگمایی الترامافیک می باشند. دیوپسید کروم یکی از بهترین شاخص های محیط های حاصلخیز نیکل مس می باشد، ولی لزوماً شامل نهشته های نیکل-مس نمی باشد.

مینرالوژی شاخص سنگین یک روش حساس تر از آنالیز شیمیایی کانی های سنگین بوده و مزیت های بسیاری را در برنامه های اکتشافی می دهد که شامل موارد زیر است: 1- کارایی نمونه برداری 2- بزرگی اهداف سنگ بستر و حوزه های انتشاری 3- پوشش طیفی از مواد معدنی و کانی ها 5- شواهد مربوط به منشا حوزه های انتشاری و 6- شاخص های پتانسیل اقتصادی کانی سازی مبداء. این خود یک ابزار اکتشافی ارزیابی اولیه بوده و برای تست تراس های پلوتونیک و رسوبی آتش فشانی گنیس مناسب است که در آن نهشته های رسوبی فلزی ارزشمند اصلاح شده و تشخیص آن ها با روش های دیگر سخت است.

فراوری آزمایشگاهی نمونه های کانی های سنگین اغلب در برنامه های اکتشاف ژئوشیمیایی در حوزه های یخچالی برای بهبود خصوصیات ژئوشیمیایی کانی های فلزی و افزایش حجم ژئوشیمیایی استفاده می شوند. لایه های یخچالی هوازده نشده بدست آمده با اکتشاف می توانند محیط نمونه برداری ایده الی باشند زیرا فلزات پایه در کانی های سولفیدی اولیه به آسانی یافت می شوند. با این حال نمونه های سطحی هوازده فاقد سولفید را می توان برای جست و جوی برخی از کانی ها نظیر طلا، پلوتونیوم، استرانسیم استفاده کرد که در کانی های مقاوم شیمیایی یافت می شود.

علاوه بر بهبود علایم ژئوشیمیایی، فراوری فلزات سنگین مزیت های بالقوه ای از طریق بررسی کانی شناسی رسوبات در اختیار می گذارند. دو مورد به صورت زیر هستند:

تعیین منابع دارای انتشار طلا از درجه فرسایش دانه های طلا و 2- شناسایی پایپ های کمبرلیت و پتانسیل الماس آن ها از کانی های شاخص کمبرلیت. در رابطه با دانه های طلا، شاخص ناهنجاری در رسوبات هم ژئوشیمیایی و هم مینرالوژیکی است. در رابطه با کانی های شاخص کمبرلیت، به شدت مینرالوژیکی است زیرا تعداد ذرات شاخص در رسوبات کم تر بوده و این دانه ها با عناصری نظیر منیزیم و کروم غنی سازی می شوند.

کانی شناسی شاخص سنگین بستگی به مواد منبع ویژه داشته و دارای خصوصیات مفید متعددی می باشد که مکمل وزن مخصوص بالا است. در رابطه با شاخص های کمبرلیت، کانی ها 1- در صورتی که سنگ هایی به جز کیمبرالیت باشند، کم تر یافت می شوند، 2- درشت بافت هستند 3- مجزا و دارای بافت منحصر به فرد هستند. 4- به اندازه کافی برای رسوب گرانشی سنگین هستند. 5- در برابر غلظت های بیشتر توسط تفکیک الکترومغناطیسی اصلاح پذیر می باشند. 6- به هوازدگی به خصوص در حوزه های یخچالی نابالغ مقاوم می باشند. از این روی حتی پایبی که دارای KIM نسبتا ضعیف تری است می تواند منبع قوی KIM باشد. به علاوه، KIM ها منبع ویژه بوده و تنها برخی از دانه ها در رسوبات یخچالی برای تشخیص حضور کیمبرلیت نیاز هستند. اخیرا رسوبات انتشاری KIM دارای طول چند ده کیلومتر گزارش شده اند و این در حالی است که علایم ژئوشیمیایی معدنی رسوبات فلزی در دریافت های یخچالی عاری از سولفید به طور کلی طول چند صد متر دارند.

اخیرا گفته شده است که کانی های شاخص فلزی با خصوصیات مشابه با KIM در زون های واکنشی و تغییر بزرگ مربوط به انواع خاصی از نهشته ها وجود دارد. 1- سولفید های ماسیو آتش فشانی رسوبی (دارای زیر انواع آتش فشانی، سدکس و می سی سی پی) در حوزه های دگرگونی با درجات بالا تا منطقه ای 2- نهشته های اسکارن و گریسن و 3- سولفید های نیکل-مس ماگمایی. شرکت مدیریت حفاری اوربوردن، یک حرف اختصاری MMSIM را برای این گونه های معدنی پیدا کرده و چند هزار نمونه را از پروژه های اکتشافی برای ناهنجاری های MMSIM تست کرده است. بسیاری از این پروژه های MMSIM شامل ذرات طلا و KIM می باشند و بسیاری از هزاران نمونه دیگر برای ذرات طلا و یا KIM به علاوه ذرات طلا تست شده اند. بیشتر نمونه ها دارای وزن 10 تا 20 کیلو بودند. انواع کم تر از 2 میلی متر با فرایند گرانشی بعد از تصفیه مایع سنگین در وزن مخصوص 3.20 گرم بر سانتی متر مکعب فراوری شد. در برخی موارد، کانی های شاخص فراوری شدند. کانی های شاخص با تفکیک کننده الکترومغناطیسی دانه بندی شده و توسط زمین شناسان با استفاده از دور بین دو چشم با تفکیک پذیری سخت دانه ها تحت طیف سنج اشعه ایکس با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نگاره تعیین شدند. دانه های طلا از نهشته

های اصلی جدا شده، شمرده شده، اندازه گیری شده و با دور بین دو چشم با بررسی بیشتر توسط SEM/EDS در پروژه های خاص طبقه بندی گردیدند.

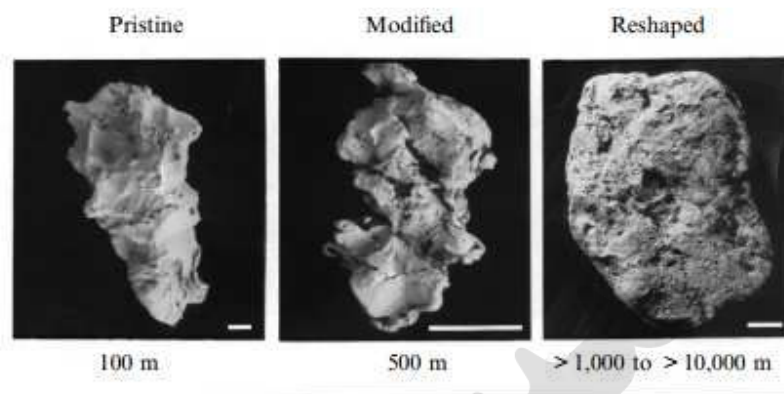
جدول 1: دنباله های انتشاری ذرات طلائی منتخب در حوزه های یخچالی کانادا

طرح طبقه بندی اصلی ODM در دهه 1970 برای این ذرات طلا ارایه شد (ظریف/ نامنظم/ ساییده شده)، و توسط دیلابیو 1990 با کمک دانشمندان با استفاده از اصطلاح جنریک یا اصلی (اولیه/اصلاح شده/تغییر شکل داده شده) به روز سازی شد چرا که امکان بررسی تغییرات فیزیکی و شیمیایی را بر روی ریخت شناسی طلا می دهد.

این مقاله به توصیف کانی های شاخص مورد استفاده در مطالعات فوق و انواع الگوهای انتشاری طلائی مشاهده شده با تاکید بر MMSIM در حوزه یخچالی هوازده شده می پردازد. روش MMSIM نسبتا جدید بوده و بیشتر نتایج نظر سنجی بر روی MMSIM به صورت خصوصی گزارش شده است و از این روی بررسی منابع اندکی ارایه شده و به بحث در خصوص الگوهای پراکنشی تکراری از اکتشافات پرداخته می شود.

ذرات طلا

نهبشته ها و رسوبات متعدد طلا در کانادا با شناسایی دنباله های پراکنشی طلا به خصوص تیل ها کشف شدند. نمونه هایی از این موارد شامل گولدن پوند ایست و نهبشته های غربی در کاسا برادی کبک، نهبشته های آکاریوس در تیمینز، انتاریو، 17 زون در رینی ریور و چهار نهبشته در لا رنگه بلن ساسکچوان می باشد. مطالعات موردی بر روی معادن طلائی مختلفی با حفاری کردشی صورت گرفته اند اما در بیشتر موارد با حفاری روتاسونیک و یا نمونه برداری بیل چه ای صورت گرفته اند. داده های منطقه ای از نظر سنجی ها و تحقیقات دولتی بدست آمده اند. الگوهای پراکنش دانه های طلا به صورت زیر هستند.



شکل 2: تصاویر الکترونی انتشار پسین ذرات طلا از رسوبات یخچالی تیل که نشان دهنده رابطه بین فرسایش دانه و فاصله انتقال یخچالی است. فرایند فرسایش می تواند به صورت فشاری باشد و موجب کاهش وزن و جرم دانه های طلا نمی شود.

- ذرات زلا در تیل ها در کل کانادا وجود دارند. فراوانی پیش زمینه آن ها متغیر از یک دانه در هر 10 کیلوگرم نمونه اکتشافی در منطقه با پوشش فانروزویک قوی نظیر چمنزارهای مرکزی تا بیش از 20 دانه در هر نمونه در حواشی یخچالی حوزه های آتش فشانی بزرگ نظیر کمر بند گرین استون متغیر است.
- 80 تا 90 درصد دانه های طلا در تیل ها دارای اندازه سیلت می باشند که نشان دهنده اندازه دانه کانی سازی سنگ بستر مادی است.
- ناهنجاری های ژئوشیمیایی طلای بدست آمده از تحلیل دانه های شن فیلتر شده و اجزای سیلت تیل های خام و یا نمونه های خاک ناشی از این دانه های طلا و نه طلاهایی که به صورت شیمیایی جذب کانی های رسی شده باشند. این رابطه با میکروپنینک نمونه های غیر طبیعی و با روش های فعال سازی نوترونی غیر مصرفی اثبات شده است.
- دانه های طلای نرم و شکل پذیر سریعاً در انتقال یخی تغییر شکل می دهند و آن ها را از حالت اولیه به حالت تغییر شکل یافته در می آورند. این دفورماسیون تحت فرایند تا خوردگی و فشار رخ می دهد: وزن اصلی دانه ها تغییری نمی کند. فرایند تغییر شکل بعد از 1 کیلومتر انتقال کامل می شود اما 5 تا 10 کیلومتر انتقال در رودخانه رینی نیاز است زیرا در آن جا یخ های شناور به سرعت از طریق دریاچه یخچالی حرکت می کنند. یعنی دانه های طلای فرسایش یافته تحت تاثیر زمان انتقال قرار دارند تا فاصله انتقال.

- بیشتر دنباله ها و الگوهای انتشاری دانه های طلای مربوط به کانی سازیس دارای طول کم تر از 1 کیلومتر هستند. از این روی دانه های طلای آن ها دارای شکل اولیه و اصلاح شده است. تراکم غیر طبیعی در امتداد این الکو به صورت 2 تا 4 ذره در هر کیلوگرم می باشد اما در برخی از دنباله ها، به خصوص در کمر بند لا رنج، به ده دانه در هر کیلوگرم می رسد.

- رسوبات اسکر دارای دانه های طلای کم تری نسبت به تیل ها می باشند. این تخلیه به این دلیل رخ می دهد که رسوبات اسکر شامل دانه های شن متوسط تا درشت بوده در حالی که دانه های طلا دارای اندازه سیلت هستند. اگرچه دانه های کوچک و سنگین طلا از رسوبات درشت شسته شده و کاهش زیادی را در وزن مخصوص تجربه می کنند که با کاهش اندازه همراه است. هم چنین سرعت تخلیه سریع رسوبات اسکر امکان تجمع دانه های درشت طلا را در بستر ها نمی دهد. وقوع پلیسرها طلا نظیر مونرو اسکر در منطقه ماتسون با نهشته های ساحلی یخچالی دریاچه ای همراه است.

کانی های شاخص کیمبرلایت

Kim ها به طور مفصل در منابع دیگر بحث شده اند و در این جا فقط به طور مختصر در مورد آن ها صحبت می کنیم. سه نوع گارنت اصلی به صورت kim در این جا بحث می شوند: 1-پریروپ-کروم پریودوتیتیک-2-پریروپ-آلماندین اکولوژییتیک و 3-کروم فقیر از پریروپ مگاکریستیک. دیگر شاخص های اصلی شامل منیزیم-ایلمنیت، کرومیت و دیوپسید کروم می باشند. الیوین غنی از منیزیم و ارتوپروکسن شاخص های مکمل می باشند. کاربرد آن ها محدود است زیرا در پریودیت ها و برخی سنگ های دگرگونی علاوه بر کیمبرلایت های یافت می شوند.

شیمی گونه های kim می تواند راهنمای خوبی برای پتانسیل الماس به عنوان منبع کیمبرلایت باشد. به خصوص این که پریروپ آلماندین های هارزبورژتیک، g10، و غنی از سدیم و کرومیت غنی از کروم نشان دهنده نمونه برداری از لایه های غنی از الماس در جبهه با ماگمای کیمبرلایت و المنیت غنی از منیزیم نشان دهنده شرایط احیایی برای حفظ الماس طی صعود ماگما از طریق پوسته می باشد.

همه گونه های KIM به طور شیمیایی در توده های یخچالی نابالغ پایدار هستند: دیوپسید کروم و گارنت به طور انتخابی در حوزه های یخچالی تخریب نمی شوند. با این حال برخی KIM های خاص نظیر گارنت ها، به صورت دانه های با شکستگی بالا در کیمبرلیت ظاهر می شوند که ناشی از هیدراته شدن طی ولکانیسم و یا هوازگی پیش یخچالی می باشد و اندازه دانه بعدی آن ها و فراوانی نسبی در توده های یخچالی تا حدودی با این شکستگی کنترل می شوند. ماکرو کریست های پیروپ کروم در معرض شکستگی به تعداد زیادی از دانه های با اندازه متوسط شکسته می شوند در حالی که المینیت های منیزیم مقاوم به شکستگی در اندازه شن باقی مانده و وفور کم تری پیدا می کند. در توده های پراکنشی پایپ C14 نزدیک به دریاچه کیرکلند اونتاریو، دانه های دیوپسید کروم بعد از تغییر نسبت کروم به دیوپسید و افزایش توده های یخی تحت نوسانات متعدد قرار می گیرند. دانه های متوسط تا درشت به جای دانه های طلای با اندازه سیلت KIM در رسوبات اسکر نسبت به تیل ها کم تر پیدا می شوند. به علاوه، پیروپ های کروم با اندازه متوسط در بستر های شنی و منیزیم ایلمنیت در بستر های سنگریزه ای تجمع پیدا می کنند.

کانی های شاخص سولفیدی ماسیو دگرگونی ماگمایی

MMSIM ها، کانی های مقاوم به هوازگی دانه درشت سنگین می باشند که با فرایند های زیر تشکیل می شوند: 1- تبلور مجدد رسوبات سولفیدی ماسیو آتش فشانی رسوبی و هاله های تغییر هیدروترمال با دگرگونی ناحیه ای متوسط تا زیاد- 2- دگرگونی ماگمایی دمای بالا (اسکارن و گریسن) و 3- واکنش های مربوط به تفکیک و جدایش سولفید های نیکل-مس-آهن از ماگما و کماتیت الترامافیک. مقاومت آن ها به هوازگی نشان دهنده غنی سازی در عناصری نظیر منیزیم، منگنز، آلومنیوم و کروم می باشد که در نواحی متناوب هیدترمال آلومینوز اسیدی متمرکز شده است. معمولاً سنگ های رسوبی گوگردی، فلسیک با ماگمای الترامافیک و لاوا طی تشکیل رسوبات نیکل و روی دیده می شوند.

توده های پراکنشی MMSIM به دلیل این که کانی های شاخص منعکس کننده هر دو نهشته ها و تغییرات متناوب آن ها و برخی از کانی های دیگر منحصر به فرد می باشند به صورت بازالتی و بزرگ دیده می شوند. با این

حال، برخی از MMSIM ها نظیر کیانیت، سلیمانیت، استرولیت و ارتوپروکسن کم تر از سایرین مفید هستند زیرا آن ها در سرتاسر حوزه های دگرگونی منطقه ای درجه بالا و نیز مناطق با تغییرات متناوب هیدروترمال دیده می شوند. از یک سو، برخی از MMSIM ها غنی از فلزاتی به جز عناصر ناحیه تناوب بوده و شاخص های مفیدی از نظر پیروپ کروم G10 در مطالعات KIM گزارش شده اند. نمونه های رایج شامل کرانیت، استرولیت روی، ولمیت و فرانکلیت در زون های تغییر سولفید ماسیو دگرگونی شده و شلیا و کاستریت در اسکارن ها و گریسن می باشد. در صورتی که نهشته های معدنی دارای کانی های گران بها باشند، عناصر شاخص بومی نظیر دانه های طلا و آلیاژ های PGE در حوزه های انتشاری یافت شده و این در حالی است که بخش دانه ریز از نمونه ها باید برای استفاده از این کانی ها فراوری شوند.

آرسنید ها نظیر اسپرلیت، رامل برگلیت و لولینگیت نیز نسبتا پایدار می باشند حتی در رسوبات موحود در مناطق غیر یخچالی و به عنوان MMSIM مورد استفاده قرار می گیرند. بیشتر کانی های سولفیدی بسیار ناپایدار می باشند. با این حال ODM گزارش کرده است که کالکوپیریت در رسوبات سطحی جهان به شدت پایدار است. در مناطق غنی از مس، یافتن 50 تا 100 دانه کالکوپیریت فاقد پیریت امری طبیعی است. تحقیقات بیشتر بر روی پایداری کانی برای توجیه این پدیده مهم لازم است. با این حال دانه های کالکوپیریت مشاهده شده، بازمانده های جمعیت های سولفیدی بوده و ناهنجاری های مس قوی تری از تعداد دانه ها هستند.

شاید مهم ترین کاربرد کالکوپیریت به عنوان یک MMSIM در 1994 در خلیج ویزی در نهشته های نیکل روی و مس در لابرادور بود. نخستین شاخص ها و علایم رسوبات یک سال قبل یافت شده بود زمانی که نمونه برداری هایی از دریاچه در رخنمون های سنگی از طرف شرکت منابع میدانی الماس گرفته شود. در نتیجه این پروژه تاکید بیشتری بر کیمبرلیت در 1994 و ODM برای فراوری نمونه های رسوبی 1993 داشت. تمرکز بالای این شرکت موجب یافت هیچ گونه KIM نشد. سه نفر یعنی مایک مک کرات، ریچارد گارنت و راد بیگر یک کنفرانس تلفنی را برای نشست در 13 می 1994 برگزار کردند. گزارش این نشست در زیر دیده می شود

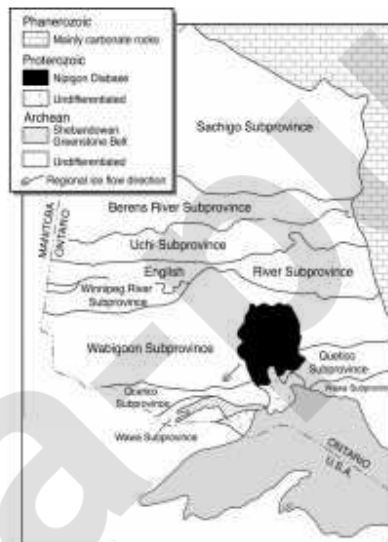
آزمایشگاه حفاری اتاوا در خصوص نتایج آزمایش ابهاماتی ایجاد کرد. گفته می شود که تست الماس و نتایج به طور غیر طبیعی سطوح بالایی از سولفیدی را نشان داد که یک ترکیب شیمیایی می باشد که حضور فلزات پایه را نشان می دهد. هدف شرکت میدان الماسی در خصوص سولفید ها چه بود؟ سه نفر خاطر نشان کردند که آزمایشگاه باید وجود سولفید ها را پایش کرده و گزارشاتی را به گارنت بفرستد.

گارنت اقدام به پایش داده ها با بررسی رنگ های مختلف کرد طوری که سبز نشان دهنده وجود مس و زرد نشان دهنده وجود پیریت بود. بعد از چند هفته، مناطق اطراف خلیج ویزی مملو از نقاط سبز و زرد بود که شبیه یک نقاشی خام به نظر می رسید. گارنت که با غلظت بالای سولفید متعجب شده بود، گارنت شروع به ارایه گزارشات زمین شناسی در مورد منطقه کرد. او بعد از خواندن گزارش چند ساله با دولت فنلاند، یک سری دیدگاه های جدید را در این زمینه ارایه کرد.

کشف MMSIM در رسوبات سطحی در خلیج ویزی ضمن جست و جوی KIM نشان دهنده چند منظوره بودن کانی های شاخص در مقابسه با آنالیز های ژئوشیمیایی کانی شناسی است. به علاوه، دانه های کالکوپیریت مشاهده شدند علی رغم این که غلظت های معدنی فلزات سنگین اندازه متفاوتی داشتند و وزن آن ها بیش از 2 کیلوگرم بود که ناشی از وجود تعداد زیاد گارنت و دیگر کانی های فرسایش یافته از گنیست ارکین در استان ناین می باشد. با رقیق شدن مواد و کانی های سنگین، مس در کالکوپیریت تنها غلظت کمی را دارد و از این روی باید از روش های استخراج انتخابی سولفید استفاده کرد.

وضعیت مشابه در کمر بند گرین استون شابندن (شکل های 1 و 3) در شمال غرب اونتاریو مشاهده شد به جز رقیق شدن کانی های سنگین که ناشی از انتقال یخچالی پیروکسن از رسوبات غنی از پیروکسن در امتداد 70 کیلومتری به شمال شرق است. سنگ بستر محلی کمر بند گرین استون با اجزای قطعه سنگی می تواند نقش مهمی در ایجاد این فرایندها داشته باشد کمبود کانی های سنگین نمی تواند از اهمیت شاخص بودن رسوبات بکاهد و در واقع دانه های طلا با خلوص بالا و دانه های MISMM در حوزه با پیروکسن خارجی غالب تر می شوند. این نوع از رقیق شدگی به ندرت در توده های غیر یخچالی دیده می شود زیر منابع کانی سنگین از نظر جغرافیایی محدود هستند.

MMSIM به طور مرتب توسط زمین شناسان ODM در توده های انتشاری از نهشته های سولفیدی آتش فشانی رسوبی، اسکارن/گریسن و نهشته های نیکل-مس ماگمایی دیده می شود. توده های پراکنشی MMSIM به دلیل این که کانی های شاخص منعکس کننده هر دو نهشته ها و تغییرات متناوب آن ها و برخی از کانی های دیگر منحصر به فرد می باشند به صورت بازالتی و بزرگ دیده می شوند. با این حال، برخی از MMSIM ها نظیر کیانیت، سلیمانیت، استرولیت و ارتوپروکسن کم تر از سایرین مفید هستند زیرا آن ها در سرتاسر حوزه های دگرگونی منطقه ای درجه بالا و نیز مناطق با تغییرات متناوب هیدروترمال دیده می شوند. از یک سو، برخی از MMSIM ها غنی از فلزاتی به جز عناصر ناحیه تناوب بوده و شاخص های مفیدی از نظر پیروپ کروم G10 در مطالعات KIM گزارش شده اند. نمونه های رایج شامل کرانیت، استرولیت روی، ولمیت و فرانکلیت در زون های تغییر سولفید ماسیو دگرگونی شده و شلیا و کاستریت در اسکارن ها و گریسن می باشد. در صورتی که نهشته های معدنی دارای کانی های گران بها باشند، عناصر شاخص بومی نظیر دانه های طلا و آلیاژ های PGE در حوزه های انتشاری یافت شده و این در حالی است که بخش دانه ریز از نمونه ها باید برای استفاده از این کانی ها فراوری شوند.



شکل 3- نقشه زمین شناسی سنگ بستر انتاریوی شمال غرب نشان دهنده موقعیت کمر بند گرین استون به دیاباز نیپگون است. جریان یخی به طرف جنوب غرب دیاباز است که تیل را با پیروکسن آلوده می کند که مانع از واکنش ژئوشیمیایی کانی سازی محلی در تیل ها در منطقه شباندون می شود.

کانی های شاخص سولفیدی ماسیو رسوبی آتش فشانی دگرگون شده

گونه های MMSIM مرتبا مشاهده شده در رسوبات پراکنشی یخچالی مربوط به شاخص سولفیدی ماسیو رسوبی آتش فشانی دگرگون شده در جدول 2 همراه با عناصر شاخصی نشان داده شده است که در آن کانی ها غنی سازی شده اند. کانی ها بسیار متنوع هستند زیرا شامل گونه هایی هستند که مربوط به همه بخش های زون های تغییر و نیز رسوبات سولفیدی واقعی می باشند. در سیستم سولفیدی ماسیو آتش فشانی دارای منگنز، دگرگونی مجاورتی، و پیپ های تغییر کلریتی با رگه های کالکوپریت موجب افزایش اندازه کالکوپریت شده و تولید آنتوفیلیت $(\text{Mg,Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ + سرپانتین $(\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12})$ می کند در حالی که دگرگونی منطقه تغییر اپیدوت-کوارتز منجر به تولید منگنز-اپیدوت $(\text{Ca}_2(\text{Al,Fe,Mn})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{OH})$ می شود. کانی های مشاهده شده در بخش های پراکنشی و عناصر شاخص آن ها شامل کالکوپریت، باریت، گانیت، اسپینل-ساپیرین، کیانیت-سلیمانیت، آنتوفیلیت-ارتوپیروکسم، سپسارتین، اپیدوت قرمز، روتیل قرمز، و للیجینیت می باشند. توجه داشته باشید که بیشتر عناصر شاخص با هم مشترک هستند و دارای کانی های سنگین غیر شاخص بوده و با استخراج انتخابی در آزمایشگاه تحلیلی هم خوانی دارند. از این روی ناهنجاری های مربوط به KIM با تحلیل ژئوشیمیایی به ندرت قابل تشخیص هستند. حتی مس در کالکوپریت و روی در گانیت را به سختی می توان شناسایی کرد زیرا غلظت غیر عادی این کانی ها به صورت ده دانه در هر نمونه می باشد. تنها کانی های شاخص در جدول 2 به سطوح درصد در غلظت های کانی سنگین مربوط به کیانیت، سلیمانیت، استرولیت، سپسرنیت، آنتوفیلیت، ارتوپیروکسن و باریت می باشند.

در خصوص ناهنجاری های KIM، بهترین ناهنجاری های MMSIM شامل دو گونه کانی می باشند. روابط کانی مشترک در توده های پراکنشی آذراوتری دگرگون شده و نهشته های کالکوپریت گانیت و روتیل-اسپینل-کیانیت. وفور مقیاس منطقه ای کیانیت، سلیمانیت و استرولیت در حوزه های رسوبی حاوی افق های پلیتیک آلومینیومی و ارتوکسی پیروکسن در رخساره های گرانولیت، می تواند نقش این کانی ها را در قبال MISMM مکمل با فورستریت و انستایت در کشف الماس تقویت کند.

Indicator mineral	Chemical composition	Indicator elements
sillimanite	Al ₂ SiO ₅	Al
kyanite	Al ₂ SiO ₅	Al
corundum	Al ₂ O ₃	Al
anthophyllite	(Mg,Fe) ₇ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Mg
orthopyroxene	(Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆	Mg
Mg-spinel	MgAl ₂ O ₄	Mg, Al
sapphirine	(Mg,Al) ₆ (Al,Si) ₆ O ₂₀	Mg, Al
staurolite	(Fe,Mg,Zn) ₂ Al ₄ (Si,Al) ₄ O ₂₂ (OH) ₂	Mg (±Zn), Al
tourmaline	(Na,Ca)(Mg,Fe) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ (Si ₆ O ₁₈)(OH) ₄	Al, B
dumortierite	Al ₇ (BO ₃) ₃ (SiO ₄) ₃ O ₃	Al, B
Mn-epidote	Ca ₂ (Al,Fe,Mn) ₂ Si ₂ O ₁₂ (OH)	Mn
spessartine	Mn ₂ Al ₂ Si ₂ O ₁₂	Mn, Al
gahnite	ZnAl ₂ O ₄	Zn, Al
franklinite	(Zn,Mn,Fe)(Fe,Mn) ₂ O ₄	Zn, Mn
willemitite	Zn ₂ SiO ₄	Zn
Cr-rutile	(Ti,Cr)O ₂	Cr
barite	BaSO ₄	Ba, S
chalcocopyrite	CuFeS ₂	Cu, S
cinnabar	HgS	Hg, S
loellingite	FeAs ₂	As
native gold	Au	Au

جدول 2- کانی های شاخص سنگین زون های تغییر هیدروترمال مربوط به نهشته های سولفیدی ماسیو در حوزه

های یخچالی

Indicator mineral	Chemical composition	Indicator elements
SKARN:		
forsterite olivine	Mg ₂ SiO ₄	Mg
knebelite olivine	(Fe,Mn) ₂ SiO ₄	Mn
vesuvianite	Ca ₁₀ Mg ₂ Al ₄ (Si ₂ O ₇) ₂ (SiO ₄) ₉ (OH) ₄	Mg
johannsenite	CaMnSi ₂ O ₆	Mn
grossular	Ca ₃ Al ₂ Si ₂ O ₁₂	Al±Cr
scheelite	CaWO ₄	W
chalcocopyrite	CuFeS ₂	Cu, S
native gold	Au	Au
GREISEN:		
topaz	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂	Al, F
tourmaline	(Na,Ca)(Mg,Fe) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ (Si ₆ O ₁₈)(OH) ₄	Al, B
fluorite	CaF ₂	F
cassiterite	SnO ₂	Sn
wolframite	(Fe,Mn)WO ₄	Mn, W
chalcocopyrite	CuFeS ₂	Cu, S

جدول 3- کانی های شاخصی فلزات سنگین اسکارن و نهشته های گریس در حوزه های یخچالی

کانی های شاخص گونه هایی از کانی هایی می باشند که به طور شیمیایی و مکانیکی به هوازدگی در صورتی که در رسوبات کلاستیک وجود داشته باشند مقاوم نشان داده و یک نوع کانی زایی سنگ بستر را نشان می دهند. خواص فیزیکی و و شیمیایی آن ها از جمله چگالی نسبتا بالا، موجب تسهیل حفاظت و شناسایی آن شده و آن ها به آسانی از محیط های نمونه نظیر تیل ها، رسوبات یخچالی و خاک، ساپرولیت ها و حتی در گوسان بازیابی می شوند. کانی های شاخص یک روش اکتشاف مهم در طی 20 سال گذشته بوده و در حال حاضر برای شناسایی طیف وسیعی از تیپ های نهشته های رسوبات کانسنگ از جمله الماس، طلا، Ni-Cu, PGE، مس پورفیری، سولفید و نهشته های تنگستن مورد استفاده قرار می گیرد.

Indicator mineral	Chemical composition	Indicator elements
hercynite	FeAl ₂ O ₄	Al
olivine	(Mg,Fe)SiO ₄	Mg
orthopyroxene	(Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆	Mg
low-Cr diopside	Ca(MgCr)Si ₂ O ₆	Mg, Cr
chromite	(Fe,Mg)(Cr,Al) ₂ O ₄	Cr, Mg, Al (±Zn)
uvarovite	Ca ₃ Cr ₂ Si ₃ O ₁₂	Cr
Cr-rutile	(Ti,Cr)O ₂	Cr
chalcopyrite	CuFeS ₂	Cu, S
loellingite	FeAs ₂	As
rammelsbergite	NiAs ₂	Ni, As
sperrylite	PtAs ₂	Pt, As
PGE alloys	PGE	PGE

جدول 4- کانی های شاخص سنگین نهشته های سولفیدی نیکل و مس ماگماتیت در حوزه های یخچالی

با این حال این محدودیت تنها به حوزه های دگرگونی نوع باروین پرفشار قابل اعمال است و این در مناطق با دمای بالا نظیر رسوبات نوع آبوکام (ماشیرو 1973) که چنین کانی هایی تنها در زون های تغییر پایدار هستند دیده نمی شوند. به علاوه، ترکیبات شیمیایی مناطق تغییر هیدروترمال اغلب آن چنان خاص هستند که یک کانی دگرگونی خاص تنها در این مناطق در حوزه باروی تشکیل می شود. برای مثال، مناطق تغییر مربوط به رسوبات دریاچه اسنو در مانیتوبا دارای استروولیت_کیانیت می باشند در حالی که کانی اصلی آلومینیومی در گنیس به صورت سلیمانیت می باشد. در برخی موارد نظیر 17 زون در رودخانه رینی، انتاریو، پوشش های متناوب هیدروترمال غنی از منگنز و آلومینیوم می باشند که کانی هایی نظیر سرپانتین و کیانیت تحت شرایط شایسته شایسته سبز دگرگونی قرار می گیرند که طبیعت پایداری نیز دارند. چنین فرایندهایی بیشتر توجه زمین شناسان را به خود جلب کرده است. بیشتر زون های تغییر هیدروترمال در رخساره های گرین شیست با کانی های با چگالی کم، دانه ریز غالب بوده و با روش MMSIM قابل شناسایی نیستند.

کانی های شاخص اسکارن و گریسن

گونه های MMSIM مرتبا مشاهده شده در توده های پراکنشی یخچالی مربوط به کانی سازی اسکارن و گریسن در جدول 3 همراه با عناصر های شاخص که در آن کانی ها غنی هستند نشان داده شده است. شاخص های اسکارن شامل فورستريت، نبلیت، جانسیت، گراسلار، کالگوپیریت و شیلیت در این دسته قرار می گیرند. شاخص های گریسن شامل توپاز، ترمالین، فلوریت، کاستریت و لوفرامیت می باشند. هیچ گونه نمونه برداری توده یخچالی نزدیک نهشته

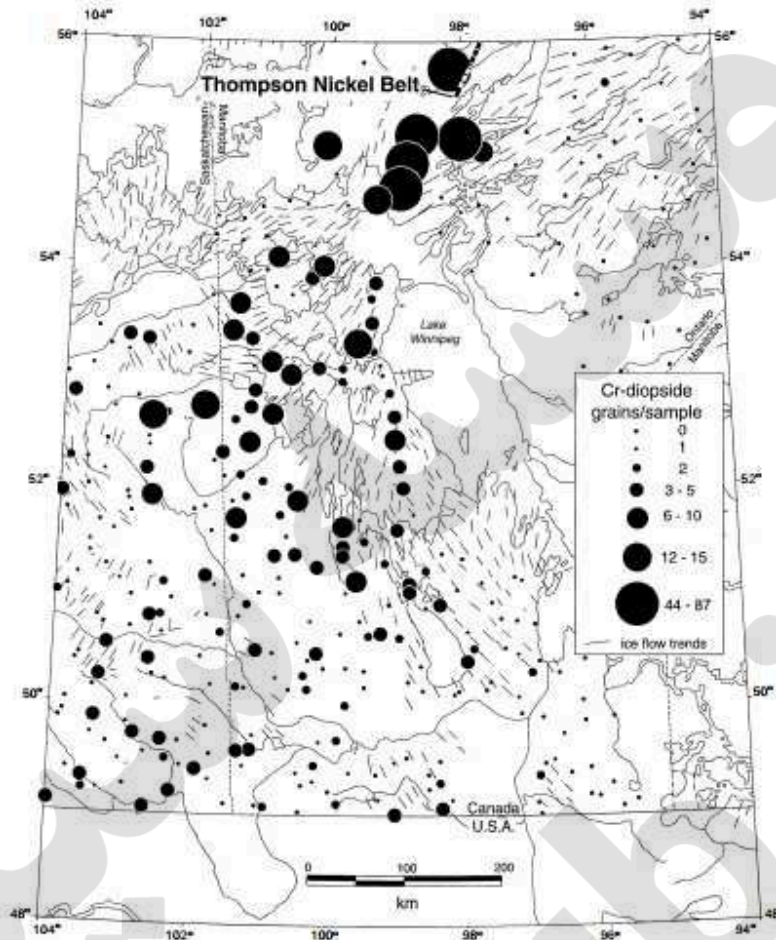
های نوع دام المپیک دیده نشده است ولی کانی های شاخص با دمای بالا در اسکارن ها و گریسن ها دیده شده است.

کانی های شاخص سولفید ماسیو نیکل-مس

گونه های MMSIM مرتبا مشاهده شده در حوزه های پراکنشی یخچالی با کانی سازی سولفید ماسیو نیکل و مس میزبان نفوذ های مافیک و الترامافیک لایه ای می باشند که در جدول 4 با عناصر شاخص درون آن نشان داده شده اند. این کانی ها شامل الیوین (به خصوص فرستريت غنی از آهن)، ارتوپيروكسن (به خصوص برونزيت و انستاتيت غنی از منیزیم)، دیوپسید کروم (منیزیم کروم)، کرمیت (کروم، منیزیم و الومینیوم)، اواریت (کروم)، روتیل قرمز (کروم)، هرسیانیت (آلومینیوم)، کالکوپیریت (مس و گوگرد)، لولینزیت (آرسنیک)، رامل اسبرگیت (نیکل و آرسنیک)، اسپرلیت (سرب و آرسنیک) و آلیاژ های بومی PGE می باشد. الیوین، پیروکسن و کرومیت در سنگ های الترامافیک معدنی و غیر معدنی دیده می شوند.

تعداد زیادی از کانی های شاخص نیکل-مس با سهولت نهشته های سولفیدی مس و نیکل وجود دارند. این تنوع نشان دهنده فرایند هیبریدیزاسیون می باشد که مایع نیکل-مس-آهن و گوگرد را از ماگمای الترامافیک جدا می کند. آزمیلاسیون تولید سنگ های آلومینیوم منیزیم نظیر الیوین و پیروکسن نظیر گابرو می کند و از این روی موجب ترکیب منیزیم، آهن کروم با آلومینیوم و سیلسیم در کانی های هیبریدی نظیر کرومیت $((Fe, Mg)(Cr, Al)_2O_4)$ ، اواریت $(Ca_3Cr_2Si_3O_{12})$ ، و هرسیانیت $FeAl_2O_4$ می شود. بسیاری از ترکیبات دیگر نیز امکان پذیر هستند. برای مثال اگر کروم مازاد بعد از تبلور کرومیت و اواریت وجود نداشته باشد، کانی های پذیرنده کروم نظیر دیوپسید و روتیل به گونه های شاخص تبدیل می شوند.

دیوپسید دارای کروم یک کلینوپيروكسن اصلی از پیروکسنیت و افق های پریدیتیک مرتبط با رسوبات نیکل در اتاکامپو فنلاند و در سیل های دمونت و نفوذی های لاک روچر می باشد. این خود یک کانی شاخص مس و نیکل بسیار مفید در توده های یخچالی است. برای مثال توده های انتشاری مهم حاوی دیوپسید کروم می باشند ولی کانی های شاخص دیگر از نهشته های نیکل، روی و PGE دیده می شوند.



شکل 4- توزیع دیوپسید کروم در تیل های سطحی در مانیتوبا، ساسکاچوان و الرتا. به تمرکز کانی ها از 400 کیلومتری جنوب غرب از کمر بند نیکلی تامسون دقت کنید.

هم چنین توده های رسوبی به طول 400 کیلومتری در کمر بند نیکل تامسون در مانیتوبا دیده می شود. در نزدیکی تامسون، دیوپسید کروم در این منطقه با شاخص های کروم نظیر کالکوپیریت، هرسیانیت و کرومیت همراه است که به عنوان کانی های فرعی در نهشته های نیکل در نظر گرفته می شوند. اگرچه توده های انتشاری ارتباط شفافی با کمر بند های نیکل دارد و منبع واقعی دیوپسید کروم محدودیت ضعیفی دارد زیرا اطلاعات کمی در مورد شیمی کلینو پیروکسن در افق های پریدیت و پیروکسنیت وجود دارد. افق های دارای نیکل شامل هرزبروکیت و ارتوپروکسنیت می باشند ولی هزورلیت، والریت، وب استریت و کلینوپروکسنیت موجود می باشند. بیشتر کلینوپروکسن در این فاز ها به آمفیبول تغییر پیدا کرده اند ولی این سه دانه از توده الترامافیک 2 باد دوسبیا

1978 بررسی شده و همگی دیوپسید های کروم بودند. ارتوپروکسن های با سنک های مشابه نیز دارای کروم اکسید قابل توجهی بودند. در لاک روچر، کبک، فاز نفوذی اصلی کلینو پیروکسن در هر دو فاز های معدنی و غیر معدنی می باشد که کروم دیوپسید به ترمولیت کروم+ کروم ماکنتیت استحاله می شود. ارتوپروکسن به صورت کروم دار تعریف می شود ولی کروم نیز به صورت دیوپسید در نظر گرفته می شود. کمر بند نیکل تامسون بسیار بزرگ تر از نفوذی های لاک روچر بوده و دارای دیوپسید کروم 1 درصد در سنگ های الترامافیک می باشند که برای توجه توده های کروم دیوپسید در تیل کافی است. افق های کربانه دیوپسیدی در رسوبات میانی به فراوانی وجود دارند که پریودیت و پیروکسنیت را احاطه می کنند. دیوپسید کروم به عنوان شاخص نیکل-مس استفاده شده و دارای کروم اکسید کم تری از کیمبرلیت می باشد. با این حال هم پوشانی زیادی در هر دو مقدار کروم و رنگ بین انواع گزارش شده است. کیمبرلیت ها دارای کروم دیوپسید در شش پاراژنز می باشند که دارای مقدار کروم کم تری نسبت به دیوگسید کروم زرد می باشند که به عنوان کانی شاخص زرد در نظر گرفته می شود. دانه های کروم دیوپسید به عنوان شاخص نیکل و مس کم تر در سنگ های رسوبی شناخته شده اند. در واقع هر دانه کرومیت در توده های دیوپسید کروم دارای روی است و نشان می دهد که سنگ های منشا آن ها دارای مقدار زیادی سولفید های رسوبی می باشند. از این روی در کشف نیکل-مس همانند اکتشاف الماس، شیمی دانه های کرومیت همانند کانی های شاخص دیگر مهم است. مزیت های اصلی کانی های شاخص در تحلیل های ژئوشیمیایی به صورت زیر است:

- کارایی نمونه برداری اصلی در کشف فلزات پایه از طریق جابه جایی رسوبات سطحی هوازده شده برای رسوبات مدفون و کاهش نیاز به نمونه برداری عمقی
- افزایش قابل توجه سنگ بستر هدف با افزایش زون تغییر به کانی سازی واقعی. چون این بزرگ نمایی در سه بعد رخ می دهد، امکان شناسایی اهداف معدنی پوشیده وجود دارد
- افزایش چند برابر دنباله های پراکنشی با کاهش آستانه شناسایی هر دو عنصر تغییر نظیر منیزیم، منگنز، آلومینیوم و کروم و فلزات پایه نظیر روی، مس و نیکل به سطح کانی اولیه

- حساسیت زیاد در توده های با کانی های سنگین غیر شاخص
 - پوشش طیف وسیعی از ترکیبات کانی در یک تحقیق
 - شواهد موجود در خصوص فواصل انتشاری از جمله درجه تغییر شکل دانه های طلاو پلاتین و درجه تفکیک KIM از حلقه های تغییر
 - شواهد ارزشمند مربوط به منطقه تغییر شامل نوع و تعداد گونه های شاخص در توده های انتشاری و شیمی KIM نظیر پریوپ کروم یا MMISM نظیر گانیت، استرولیت و کرومیت وجود دارد.
- با وجود اهداف بزرگ و زمینه های قابل شنایایی از نمونه های زیاد ، کانی شناسی شاخص سنگین یک ابزار اکتشافی مهم محسوب می شود. قابلیت ارزیابی به خوبی برای KIM و حتی برای MISSM شناسایی شده است. توده های پلوتونیک(نفوذی) و اذر اواری دگرگون شده پروتروزوییک تحت اکتشافات فلزی پایه ناچیز به دلیل مشکل بودن شناسایی پرولیت های غنی و شرایط هیدروترمال متبلور گزارش شده است. کانی شناسی شاخص سنگین توانایی زیادی را برای توسعه آینده این توده نشان می دهد.