

عنوان: واکنش‌های اکسایش-کاهش و پیوندهای معدنی و آلی در دهانه جزرو، مریخ

دکتر راهوار

آریانا سیف‌اللهی 402100837- نرگس صفری 402100872

- مقدمه و هدف پژوهش
مریخ‌نورد پرسویرنس (Perseverance) ناسا نخستین مأموریتی است که با هدف جمع‌آوری و بازگرداندن نمونه‌های سنگی از مریخ طراحی شده است.
این پژوهش به بررسی دقیق سازند برایت آنجل (Bright Angel Formation) در ناحیه نرتوا ولیس (Neretva Vallis) می‌پردازد — جایی که پرسویرنس در جریان حرکت خود در دهانه جزرو، ساختارهای رسوبی و شواهدی از واکنش‌های شیمیایی میان مواد آلی و معدنی را شناسایی کرده است.
پژوهشگران با استفاده از ابزارهای پیشرفته مریخ‌نورد، شامل PIXL، SHERLOC، SuperCam و RIMFAX، شواهدی از واکنش‌های احیاء-اکسید (Redox) میان آهن، فسفر، سولفور و مواد آلی یافتند؛ واکنش‌هایی که به احتمال زیاد در دماهای پایین و پس از رسوب‌گذاری اولیه سنگ‌ها رخ داده‌اند. هدف اصلی پژوهش، درک منشأ این واکنش‌ها و بررسی احتمال زیستی یا غیرزیستی بودن آنهاست.
- یافته‌های زمین‌شناسی
در این ناحیه، سنگ‌ها از گل‌سنگ (mudstone) و کنگلومرا تشکیل شده‌اند که حاصل رسوب‌گذاری در محیط‌های آبی آرام و کم‌عمق‌اند.
رنگ این سنگ‌ها از قرمز تا خاکستری متغیر است، که این تغییر رنگ نشانه‌ای از تفاوت در حالت اکسایش آهن در ترکیب آنهاست.
در مناطقی مانند Cheyava Falls و Apollo Temple، ساختارهای میکروسکوپی پیچیده‌ای شامل گره‌ها (nodules) و لایه‌های واکنشی (reaction fronts) شناسایی شده است. این گره‌ها در طی فرآیندهای شیمیایی پس‌رسوبی شکل گرفته‌اند و حاوی فسفات و سولفید آهن هستند.

- شناسایی مواد آلی و معدنی
بزار طیف‌سنجی SHERLOC وجود کربن آلی را در چند نقطه از سازند برایت آنجل تأیید کرده است. به‌طور هم‌زمان، تحلیل‌های PIXL نشان داده‌اند که این نواحی شامل ترکیباتی از فسفات آهن (ویویانیت – $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) و سولفید آهن (گریگیت – Fe_3S_4) هستند. این مواد معمولاً در زمین در محیط‌های آبی کم‌اکسیژن و در حضور مواد آلی شکل می‌گیرند. داده‌های SuperCam نیز نشان‌دهنده حضور رسی‌ها، سیلیکا، و سولفات کلسیم (ژپس و بازانیت) است که تأییدکننده وجود آب در زمان تشکیل این سازندهاست.
- ساختار و ترکیب شیمیایی
تحلیل عنصری سنگ‌ها نشان می‌دهد که در زمان تشکیل اولیه، محیط نسبتاً اکسیدکننده بوده است. اما بعدها در بخش‌هایی از رسوبات، به دلیل حضور مواد آلی و واکنش‌های احیایی، ترکیبات جدیدی شکل گرفته‌اند. وجود فسفات‌ها و سولفیدهای آهن در کنار کربن آلی، گواهی بر وقوع واکنش‌های اکسایش-کاهش در مقیاس میکروسکوپی است.
در تصاویر میکروسکوپی، توده‌های گرد و لکه‌دار کوچکی (که تیم علمی آن‌ها را «دانه‌های خشخاشی» و «نقاط پلنگی» نامیده) دیده می‌شوند. این ساختارها بیانگر مناطق موضعی هستند که در آن‌ها واکنش‌های شیمیایی فعال بوده است.
- تعبیر زمین‌شیمیایی
شواهد موجود نشان می‌دهد که محیط رسوب‌گذاری سازند برایت آنجل آبدار و قابل‌زیست بوده است. پس از رسوب‌گذاری، واکنش‌های میان مواد آلی و ترکیبات آهنی باعث شکل‌گیری مواد معدنی احیایی مانند ویویانیت و گریگیت شده‌اند. در زمین نیز چنین واکنش‌هایی معمولاً در محیط‌های دریاچه‌ای یا دلتایی رخ می‌دهند که اکسیژن در آن‌ها محدود است و میکروب‌ها از ترکیبات آهن یا سولفات به‌عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند. بنابراین، شباهت این الگوها در مریخ با نمونه‌های زمینی، احتمال وجود فرآیندهای زیستی را تقویت می‌کند.
- فرضیه‌های منشأ واکنش‌ها
۱. فرآیندهای غیرزیستی
واکنش‌های طبیعی میان مواد معدنی و ترکیبات آلی ساده بدون نیاز به حیات می‌توانند این مواد را تولید کنند. با این حال، چنین واکنش‌هایی معمولاً در شرایط خاص دما و ترکیب شیمیایی اتفاق می‌افتند که در داده‌های مریخ به‌طور کامل دیده نمی‌شود.
۲. فرآیندهای زیستی
در سناریوی زیستی، میکروب‌های باستانی می‌توانسته‌اند با کاهش ترکیبات آهن یا سولفات در محیط‌های بی‌هوازی، مواد معدنی مشاهده‌شده را تولید کنند.

در زمین، ترکیباتی مانند ویوانیت و گریگیت غالباً محصول مستقیم فعالیت‌های میکروبی‌اند. حضور هم‌زمان مواد آلی، نشانه‌های طیفی مشخص، و ساختارهای احیایی از این فرضیه حمایت می‌کند.

- اهمیت علمی

ترکیب شواهد معدنی، آلی و بافتی در این سازند یکی از قوی‌ترین شواهد برای وجود محیط‌های زیست‌پذیر گذشته در مریخ است.

یافته‌ها نشان می‌دهند که مریخ در گذشته دارای چرخه‌های شیمیایی پیچیده‌ای بوده که شامل تبادل الکترونی میان مواد آلی و معدنی است — فرآیندی که بر روی زمین پایه بسیاری از اشکال حیات میکروبی است. بنابراین، سازند برای آنجل می‌تواند بخشی از تاریخ شیمیایی مریخ را نمایان کند، زمانی که شرایط برای پشتیبانی از زندگی ساده وجود داشته است.

- چشم‌انداز آینده

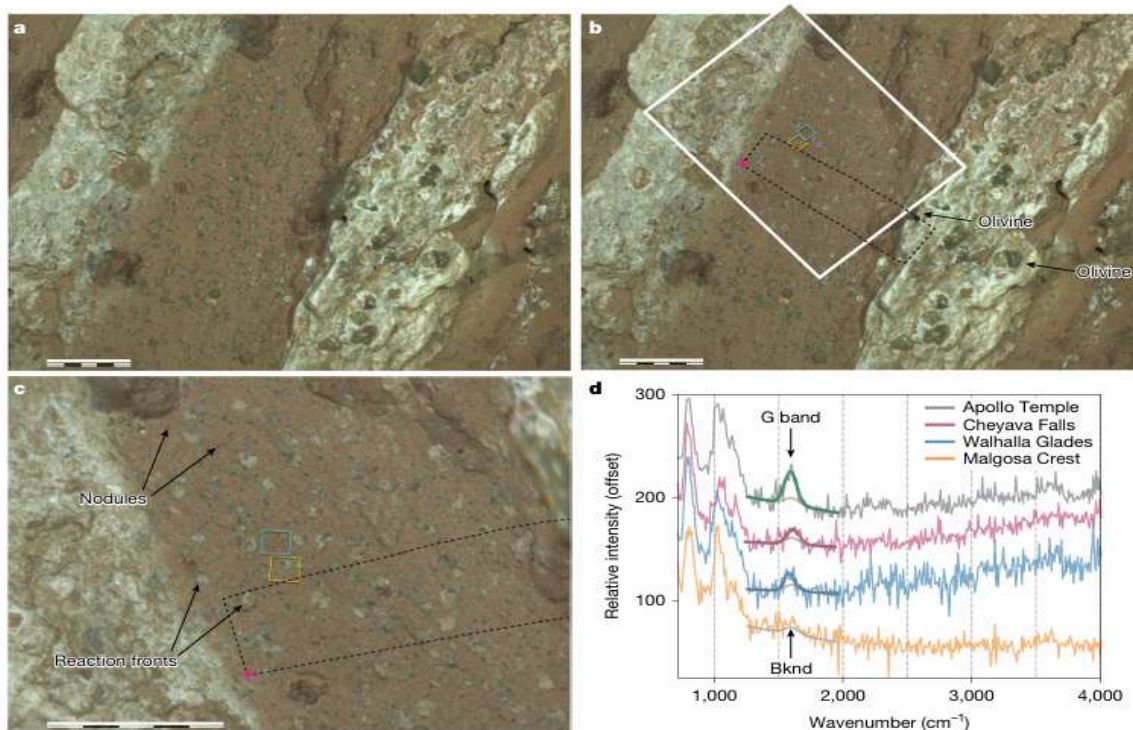
مریخ‌نورد پرسویرنس نمونه‌ای از سنگ‌های این ناحیه را با نام **Sapphire Canyon** جمع‌آوری کرده است. این نمونه‌ها قرار است در مأموریت آینده **Mars Sample Return** به زمین بازگردانده شوند تا در آزمایشگاه‌های دقیق‌تر منشأ مواد آلی و معدنی آن‌ها بررسی شود.

چنین بررسی‌هایی ممکن است برای نخستین بار پاسخ دهد که آیا حیات میکروبی واقعاً زمانی بر سطح مریخ وجود داشته است یا خیر.

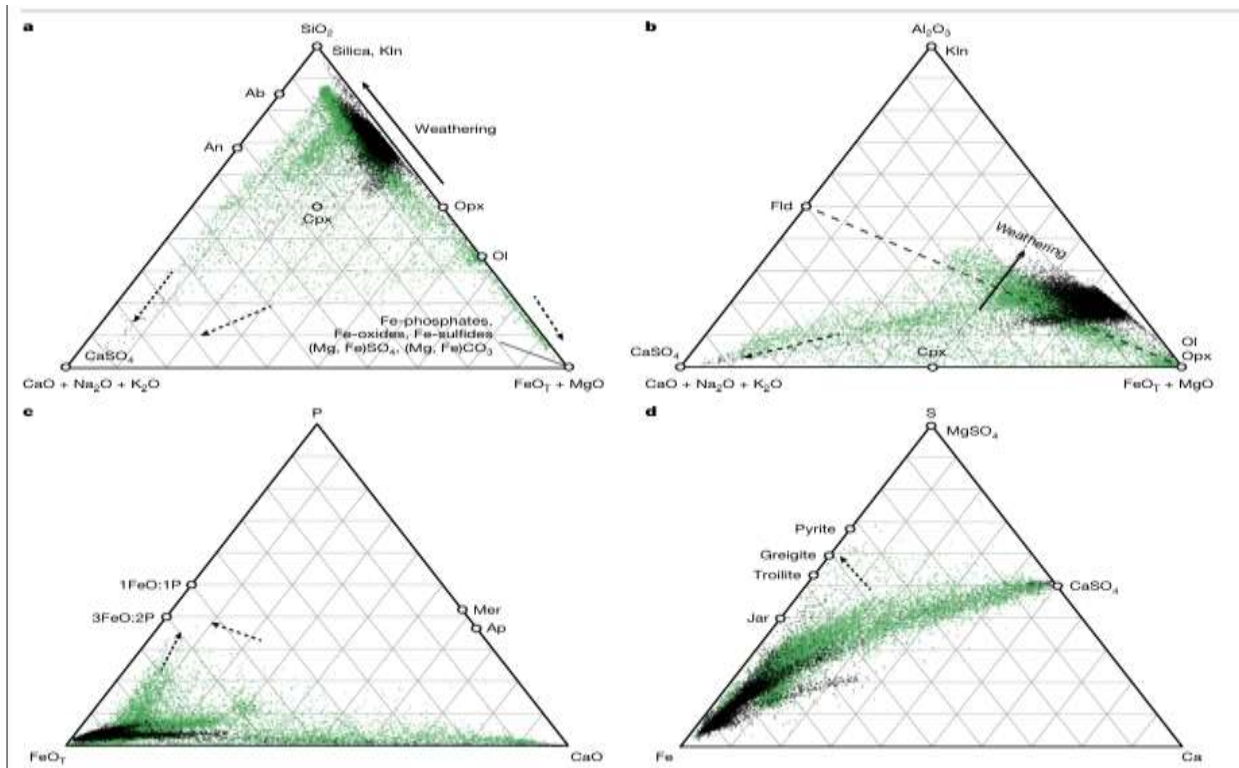
- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان می‌دهد که دهانه جزرو و سازند برای آنجل حاوی شواهدی از محیطی آبی، سرد و شیمیایی فعال هستند که در آن واکنش‌های اکسایش-کاهش میان آهن، فسفر و مواد آلی رخ داده است. هرچند هنوز شواهد قطعی از حیات به‌دست نیامده، اما داده‌ها نشان می‌دهند که مریخ زمانی شرایط زیست‌پذیر مشابه زمین اولیه را داشته است.

به همین دلیل، این منطقه یکی از کلیدی‌ترین مکان‌ها برای جست‌وجوی نشانه‌های حیات باستانی در منظومه شمسی محسوب می‌شود.



قسمت (a) و (b) عکس‌های میدانی هستند که با دوربین WATSON در شب گرفته شده‌اند. وضوح تصویر حدود ۲۱ میکرومتر بر پیکسل است. در (b) با قاب سفید محدوده‌ی اسکن ابزار SHERLOC مشخص شده و نقاط نارنجی و آبی محل برداشت طیف‌های رامن هستند. نقاط مشخص شده با عبارت‌های *Olivine* مربوط به دانه‌های الیوین هستند. در (c) مکان دقیق گره‌ها (Nodules) و نقاط واکنشی (Reaction fronts) با پیکان نشان داده شده است. این ساختارها توده‌های ریز (۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر) هستند که درون گل‌سنگ پراکنده‌اند. در (d) نمودار طیف Raman SHERLOC نمایش داده شده است. منحنی خاکستری (Apollo Temple) و قرمز (Cheyava Falls) این پیک را دارند. منحنی آبی (Walhalla Glades) شدت ضعیف‌تری دارد. منحنی زرد (Malgosa Crest) فاقد این پیک است، یعنی در آن نقطه ماده‌ی آلی شناسایی نشده. این تصویر به طور خلاصه نشان می‌دهد که در بخش‌هایی از سازند Bright Angel، کربن آلی به صورت موضعی در کنار مواد معدنی آهن‌دار (مثل الیوین و فسفات‌ها) وجود دارد. این هم‌مکانی شیمیایی یکی از قوی‌ترین شواهد برای واکنش‌های اکسایش-کاهش میان آهن و مواد آلی است — واکنش‌هایی که می‌توانند یا از فرآیندهای غیرزیستی ناشی شوند یا از فعالیت میکروبی گذشته در محیط آبی مریخ.



در این شکل، چهار نمودار سه گوش (Ternary diagrams) آورده شده‌اند که نشان‌دهنده‌ی نسبت‌های مولی عناصر اصلی در سنگ‌های بررسی‌شده هستند. داده‌ها از ابزار PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry) روی مریخ‌نورد به دست آمده‌اند.

• نقاط سبز → داده‌های مربوط به منطقه‌ی *Bright Angel*

• نقاط سیاه → داده‌های مربوط به منطقه‌ی *Masonic Temple*

هدف از این نمودارها، مقایسه‌ی ترکیب شیمیایی این دو ناحیه و شناسایی منشأ معدنی آن‌هاست.

(a) $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{FeO} + \text{MgO})$

این نمودار نسبت سیلیس، کاتیون‌های قلیایی و فلزات آهن/منیزیم را نشان می‌دهد. اکثر نقاط در محدوده‌ی بالا SiO_2 قرار دارند، یعنی سنگ‌ها از نظر شیمیایی هوازه و غنی از سیلیس و آلومینوسیلیکات‌ها هستند. فلش‌های سیاه با عنوان *Weathering* مسیر شیمیایی احتمالی را در طول هوازدگی نشان می‌دهند. در پایین نمودار، نواحی‌ای دیده می‌شوند که

مربوط به ترکیبات آهنی مانند:

- Fe-phosphates (فسفات آهن)
- Fe-oxides (اکسیدهای آهن)
- Fe-sulfides (سولفیدهای آهن)

می‌باشند — همان مواد معدنی‌ای که در تصاویر قبلی (شکل ۳) نیز مشاهده شده بودند.

(b) $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{FeO} + \text{MgO})$

در این نمودار، تمرکز بر نسبت آلومینا و عناصر قلیایی است. داده‌ها مجدداً نشان می‌دهند که سنگ‌ها غنی از آلومینیوم و آهن و فقیر از منیزیم و منگنز هستند.

(c) $\text{FeO} - \text{CaO} - \text{P}$

این بخش مهم‌ترین یافته‌ی شیمیایی مقاله است. نقاط سبز از نظر استوکیومتری معادل ماده‌ی معدنی ویوانیت $(\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$ است. به بیان ساده، این نشان می‌دهد که فسفر در این سنگ‌ها عمدتاً به شکل فسفات آهن دوظرفیتی وجود دارد — ترکیبی که در زمین معمولاً در محیط‌های آبی احیایی و زیست‌پذیر تشکیل می‌شود.

در همین نمودار، نقاط مربوط به strengite ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) و merrillite ($\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$) هم مشخص شده‌اند که به ترتیب نماینده‌ی فازهای آهنی و کلسیمی هستند.

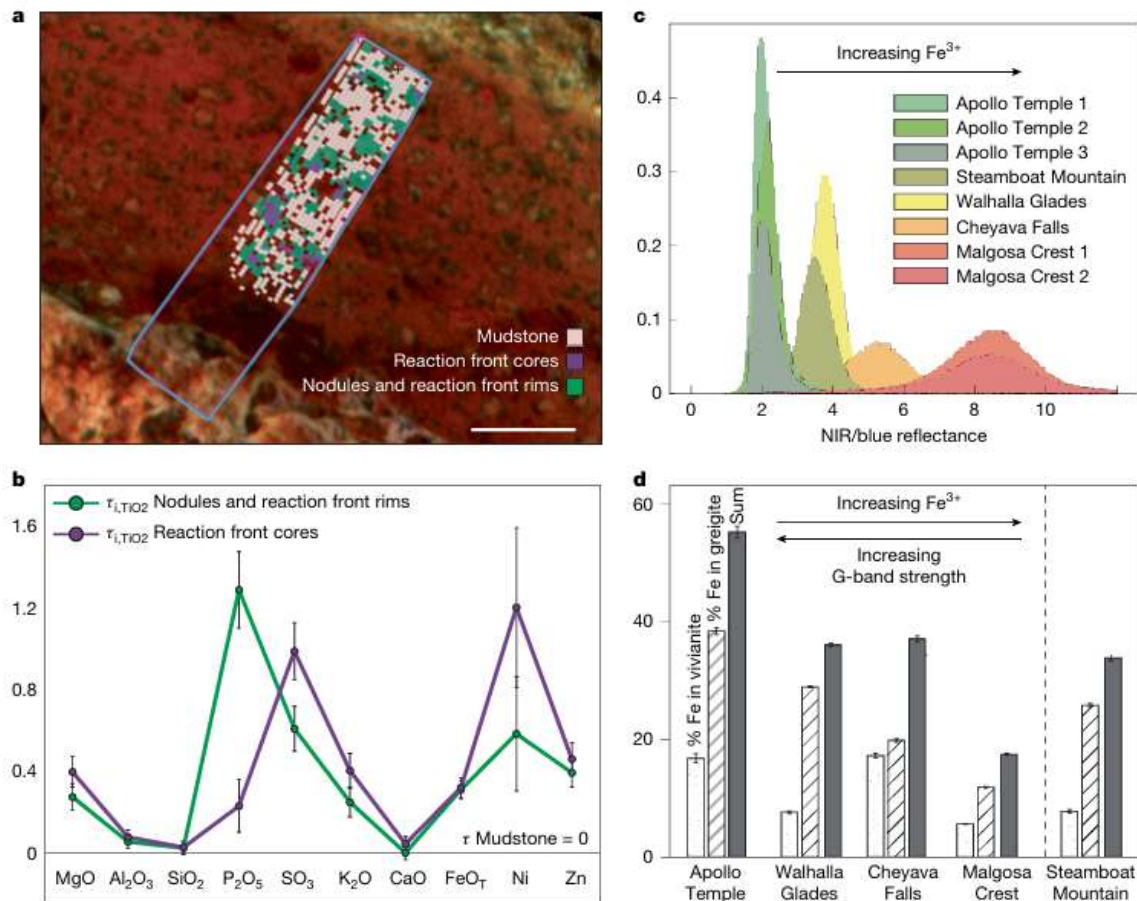
(d) $\text{Fe} - \text{CaO} - \text{S}$

این نمودار برای بررسی ترکیبات سولفیدی است. در سازند Bright Angel نقاطی دیده می‌شوند که دقیقاً منطبق با ترکیب گریگیت (Fe_3S_4) است. علاوه بر آن، مواد معدنی دیگر مانند:

- Pyrite (FeS_2)
- Troilite (FeS)
- Jarosite ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)

نیز در نمودار نشان داده شده‌اند.

وجود هم‌زمان فسفات و سولفید آهن در یک محیط، نشانه‌ای از واکنش‌های اکسایش-کاهش پیچیده میان آهن، فسفر و گوگرد است — فرآیندهایی که ممکن است در حضور مواد آلی رخ داده باشند.



تایج نهایی درباره‌ی فرآیندهای اکسایش-کاهش (Redox processes) در سنگ‌های دهانه‌ی جزرو را نشان می‌دهد. این قسمت عملاً هسته‌ی علمی مقاله است، چون نویسندگان از آن برای اثبات وجود چرخه‌های شیمیایی فعال میان آهن، فسفر و مواد آلی استفاده کرده‌اند.

(a) تصویر رنگی PIXL MCC

در این تصویر محدوده‌ی اسکن ابزار PIXL روی هدف Cheyava Falls مشخص است.

با رنگ‌ها سه نوع بخش نشان داده شده:

• بنفش: هسته‌های مرز واکنشی (Reaction front cores)

• سبز: حاشیه‌ی مرزهای واکنشی و گره‌ها

• قهوه‌ای/کرم: گل سنگ اصلی (Mudstone)

این تصویر نشان می‌دهد که در داخل سنگ، نواحی غنی از آهن و فسفر در مرزهای واکنشی متمرکز شده‌اند. این الگو گواه واکنش‌های شیمیایی موضعی پس از رسوب‌گذاری است.

(b) Element Mobility (نمودار تغییر عناصر)

این نمودار نشان می‌دهد که در نواحی واکنشی نسبت به بخش گل‌سنگ چه عناصر افزایش یا کاهش یافته‌اند:

• افزایش Fe: (Enrichment), P, Zn

• کاهش Mg: (Depletion), Al, Si

این به آن معناست که آهن و فسفر در اثر فرآیندهای شیمیایی جابه‌جا و در نقاط خاصی متمرکز شده‌اند — همان‌جایی که مواد معدنی ویویانیت و گریگیت تشکیل شده‌اند.

(c) NIR/Blue reflectance (نمودار طیفی)

این نمودار نشان‌دهنده‌ی میزان بازتاب نور در طول موج‌های نزدیک فروسرخ (NIR) نسبت به نور آبی است.

هرچه این نسبت بیشتر باشد، مقدار آهن اکسیدشده بیشتر است؛ هرچه کمتر باشد، مقدار آهن احیاءشده بیشتر است.

(d) نمودار درصد آهن در ویویانیت و گریگیت

این بخش نشان می‌دهد در هر هدف، چند درصد از آهن کل به صورت این دو ماده معدنی وجود دارد:

- Apollo Temple: (بیشترین مقدار ویویانیت + گریگیت → بیشترین حضور مواد آلی: Apollo Temple).
- Malgosa Crest: (کمترین مقدار (تقریباً فاقد ماده آلی)).
- Cheyava Falls و Walhalla Glades: در حد متوسط بین این دو قرار دارند.

این همبستگی نشان می‌دهد که هر جا مواد آلی بیشتر بوده، واکنش‌های احیایی شدیدتر شده و تشکیل ترکیبات آهنی کاهش یافته بیشتر بوده است.