

15. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A. Explosive breaking of quartz by concentrated charges in underground mining. *GIAB*. 2017. No. 10. pp. 178–185.
16. Ignatenko I. M., Yanitsky E. B., Dunaev V. A., Kabelko S. G. Jointing of rock mass in open pit at the Zhelezny mine of the Kovdor Mining and Processing Plant. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 10. pp. 11–15. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.01.
17. Aksenov A. A., Ozhiganov I. A., Gubanov D. V. The use of pressings-in method with MHS device in order to determine geomechanical state of massif and its physico-mechanical properties. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2015. No. 6. pp. 17–22.

18. Galaov R. B., Kisel A. A., Andreev A. A., Zubkov V. V. Pre-stopping assessment of stress state of ore body S-2 in Skalistaya Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 7. pp. 10–14. DOI: 10.17580/gzh.2016.07.02
19. Eremenko A. A., Shaposhnik Yu. N., Filippov V. N., Konurin A. I. Development of scientific framework for safe and efficient geotechnology for rockburst-hazardous mineral deposits in Western Siberia and the Far North. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 10. pp. 33–39. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.03
20. Volarovich M. P., Bayuk E. I., Levykin A. I., Tomashevskaya I. S. Physical and mechanical properties of rocks under high pressures and temperatures. Moscow: Nauka, 1974. 222 p.

УДК 622.83

## ПЛАНЕТАРНАЯ ТРЕЩИНОВАТОСТЬ И ЛИНЕАМЕНТНОСТЬ ВСКРЫТОГО КАРЬЕРОМ МАССИВА КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАГНЕТИТ-АПАТИТОВЫХ РУД

**И. Б. АГАРКОВ**, старший преподаватель, [agarkov@bsu.edu.ru](mailto:agarkov@bsu.edu.ru)  
**И. М. ИГНАТЕНКО**, директор Института наук о Земле, канд. техн. наук  
**В. А. ДУНАЕВ**, проф., д-р геол.-минерал. наук  
**И. С. КРЮЧКОВ**, аспирант

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

### Введение

Под планетарной трещиноватостью понимаются системы закономерно ориентированных трещин, имеющих повсеместное распространение и ряд характерных особенностей [1–3]. К планетарной трещиноватости относят и линеаменты, под которыми в подавляющем большинстве случаев подразумеваются долгоживущие тектонические линейные структуры, фиксируемые при дешифрировании космических снимков и визуальном дистанционном зондировании Земли из Космоса по цепочкам депрессий и линейных аномалий фоновых высот [4, 5].

Основной проблемой теории линеаментов, по мнению Н. В. Короновского [6], является то, что выделенные упомянутыми выше способами линеаменты не всегда являются разрывными нарушениями, и в каждом конкретном случае требуется подтверждение их геологической природы. Это подтверждение особенно важно при строительстве крупных промышленных объектов, к которым, в частности, относится разрабатываемый Ковдорское месторождение карьер рудника «Железный». Выделение из общего массива трещиноватости структур, которые могут тянуться вглубь на несколько километров, позволит более точно построить геомеханическую модель карьера, спрогнозировать устойчивость уступов и бортов, и принять правильные решения по их проектированию [7–9].

С позиций линеаментной металлогении [4] массивы ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов (Ковдорский, Вуоярви и др.), щелочных ультрамафитов и нефелиновых сиенитов (Хибинский, Ловозерский) Карело-Кольского региона размещаются в узле пересечения северо-восточного линеамента, ориентированного по линии Мурманск – Осло (азимут 40–55°), субмеридионального Кольско-Рейнско-Ливийского линеамента и линеамента северо-западного простирания (азимут 305°),

Приведены результаты анализа данных геолого-структурного картирования и документации разрывной тектоники массива горных пород карьера рудника «Железный». Исследования, проведенные в 1989–2019 гг., показали согласованность позиции и ориентировки разрывных нарушений, даек и трещин с региональными линеаментами Кольского полуострова. Отмечено, что эта согласованность будет проявляться до отработки запасов руд на любой глубине, что следует учитывать при проектировании уступов и бортов карьера, поскольку она влияет на их устойчивость.

**Ключевые слова:** Ковдорское месторождение, геолого-структурное картирование, методика ОАО «ВНПОГЕМ», планетарная трещиноватость, разрывная тектоника, региональные линеаменты, ГИС ГЕОМИКС.

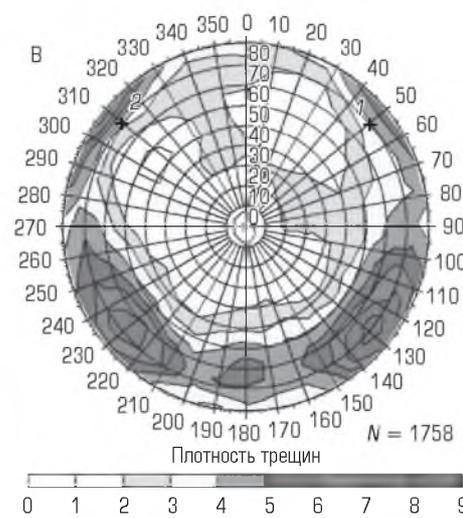
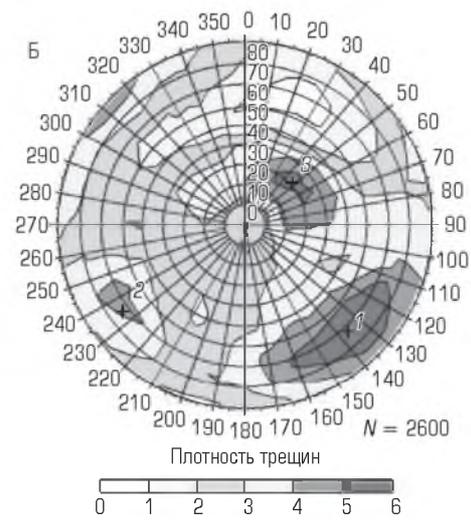
DOI: 10.17580/gzh.2020.12.06

согласного вытянутости Кольского полуострова и господствующему простиранию его основных структур. Впервые на такую приуроченность линеаментов указал А. А. Кухаренко [10]. Этой же теории придерживался и Е. М. Эпштейн, который отмечал, что «Ковдорский массив локализован в области сочленения долгоживущих крутопадающих глубинных разломов субмеридионального, северо-восточного (50°) и северо-западного (320–330°) простираний» [11].

Из вышесказанного следует, что изучение проявления планетарной трещиноватости в условиях Ковдорского месторождения магнетит-апатитовых руд (МАР) является актуальной задачей, решение которой позволит доказать, что упомянутые выше линеаменты имеют тектоническое происхождение и проявляются как разрывные нарушения. Если это подтвердится, то можно уверенно говорить о том, что сонаправленные с линеаментами разрывные нарушения, задокументированные в карьере, будут сопровождать горные работы вглубь вплоть до отработки запасов месторождения магнетит-апатитовых руд, и их положение следует учитывать при проектировании уступов и бортов карьера, так как они будут влиять на их устойчивость.

### Методика и результаты исследования

В процессе работы над данной статьей авторами были собраны, обобщены и проанализированы материалы геолого-структурного



Система	1		2		3	
	$\alpha$	$\gamma$	$\alpha$	$\gamma$	$\alpha$	$\gamma$
A	137	71	243	76	35	37
Б	137	72	235	75	45	29
B	130	81	232	77	–	–

**Рис. 1. Круговые диаграммы ориентировки трещин (А) даек (Б) и разрывных нарушений (В) приборного массива Ковдорского месторождения МАР ( $\alpha$  – азимут простирания,  $\gamma$  – угол падения)**

картирования, которое выполнялось сотрудниками ОАО «ВИО-ГЕМ» в период 1989–2019 гг. Методика геолого-структурного картирования, разработанная ОАО «ВИОГЕМ», обеспечивает непрерывную документацию разрывной тектоники, высокую точность ее привязки (до 50 см), а также определение недоступных для непосредственного изучения азимутально-угловых характеристик трещин путем дистанционной оценки их ориентировки в откосах уступов карьера с использованием лазерного сканера [12, 13] и применения фотометодов для изучения структуры массива скальных пород и состояния стационарных уступов карьера [14–16].

За указанный период выполнена документация трещин: мелких длиной 2–10 м и существенно более протяженных (до 20–30 м), а также сделано 2660 ориентировок даек карбонатов и 1758 разрывных нарушений. По каждой из задокументированных трех групп (трещин, даек, разрывных нарушений) при помощи инструмента «Полярная круговая диаграмма», реализованного в ГИС ГЕОМИКС, построены круговые диаграммы (на верхней полусфере) ориентировки трещин (рис. 1).

На построенных диаграммах по сгущению плотности точек выделяются три системы трещин: 1 – юго-восточного крутого падения; 2 – крутопадающих на юго-запад; 3 – наклонных северо-восточного падения. Система наклонных трещин северо-восточного падения менее ярко проявлена среди разрывных

нарушений и не выделяется по пиковым значениям плотности, что обусловлено сложностью ее картирования, так как на земную поверхность выходит их ограниченное количество, а подавляющее большинство находится внутри массива. Сопоставление ориентировки пиковых значений полюсов трещин с ориентировками линейментов свидетельствует о том, что региональные линейменты, упомянутые в работах [4, 10, 11], являются по своей сути разрывными нарушениями, сопровождающимися горными работами вплоть до отработки месторождения. По итогам такого сопоставления были получены следующие результаты.

**Северо-восточный линеймент (СВЛ), ориентированный по линии Мурманск – Осло**, по азимутально-угловым характеристикам соответствует структурам системы 1 (табл. 1).

Из данных табл. 1 следует, что пиковые значения ориентировки трещин, даек и разрывных нарушений попадают в диапазоны азимутально-угловых характеристик СВЛ. Азимутальные характеристики трещин и даек отличаются от средней ориентировки СВЛ всего на 0,5°, а угловые – на 4 и 3° соответственно. Чуть больше отличаются ориентировки разрывных нарушений: 7,5° по азимуту и 6° по углу. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что СВЛ в пределах рассматриваемого объекта проявляется в виде разрывного нарушения.

Азимутально-угловые характеристики крупного субвертикального транскарьерного разрывного нарушения ( $\alpha = 128\div 150^\circ$ ;

**Таблица 1. Сопоставление ориентировок трещин, даек и разрывных нарушений системы 1 с СВЛ**

Параметры сравнения	СВЛ	Трещины	Дайки	Разрывные нарушения
Азимут падения $\alpha$ , градус	130–145	137	137	130
Азимут простирания $\beta$ , градус	40–55	47	47	40
Угол падения $\gamma$ , градус	70–80	71	72	81

**Таблица 2. Сопоставление ориентировок трещин, даек и разрывных нарушений системы 2 с СЗЛ**

Параметры сравнения, градус	СЗЛ	Трещины	Дайки	Разрывные нарушения
$\alpha$	215-240	243	235	232
$\beta$	305-330	333	325	322
$\gamma$	70-80	76	75	77

$\beta = 38 \div 60^\circ$ ;  $\gamma = 70 \div 85^\circ$ ), пересекающего карьер с юго-запада на северо-восток, близки к ориентировке СВЛ ( $\alpha = 130 \div 145^\circ$ ;  $\beta = 40 \div 55^\circ$ ;  $\gamma = 70 \div 80^\circ$ ) (рис. 2).

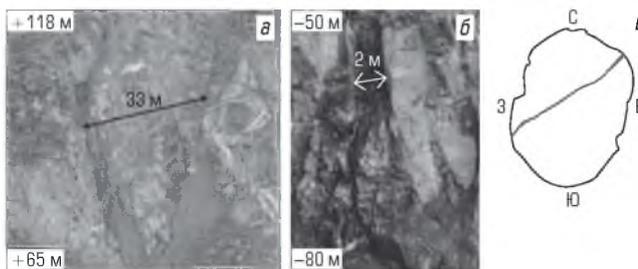
Это разрывное нарушение достаточно хорошо изучено в процессе геолого-структурного картирования прибортового породного массива и представляет собой зону дробления, мощность которой изменяется от 30–40 м на верхних горизонтах до 2–3 м ближе ко дну карьера (см. рис. 2). Тектонический шов заполнен раздробленной горной породой, на поверхности которой присутствуют следы серпентинизации, хлоритизации и ослюднения. Указанные характеристики свидетельствуют о том, что данное разрывное нарушение является мощной структурой, будет тянуться вглубь на сотни метров и оказывать влияние на устойчивость горных пород, вскрытых карьером.

В дайковом комплексе СВЛ проявляется в юго-западном борту карьера, где прослеживается крупное тело карбонатитов, простирающееся в северо-восточном направлении с элементами залегания  $\alpha = 140 \div 160^\circ$ ,  $\beta = 50 \div 70^\circ$  и  $\gamma = 69 \div 80^\circ$  (рис. 3). Оно субпараллельно ранее упомянутому транскарьерному разрывному нарушению.

Из изложенного выше следует, что в пределах Ковдорского месторождения СВЛ в качестве тектонической зоны ослабления проявляется как единичными трещинами отдельности, так и крупными тектоническими нарушениями. В связи с этим при построении тектонических моделей следует иметь в виду, что все разрывные нарушения, тяготеющие по ориентировке к СВЛ, будут прослеживаться до дна проектного карьера.

**Линеймент северо-западного простирания (СЗЛ), согласно вытянутости Кольского полуострова.** В рамках карьера рудника «Железный» диапазон азимутально-угловых характеристик СЗЛ следующий:  $\alpha = 215 \div 240^\circ$ ,  $\beta = 305 \div 330^\circ$ ,  $\gamma = 70 \div 80^\circ$ . Этому диапазону соответствует система 2 (табл. 2).

Из данных табл. 2 следует, что ориентировка даек и разрывных нарушений четко вписывается в диапазон значений СЗЛ, а трещины выпадают из него всего на  $3^\circ$ . Данное расхождение находится в пределах погрешности измерения гирокопическим компасом. В целом эти трещины имеют северо-западное простирание и крутое падение, что позволяет приурочить их к СЗЛ.



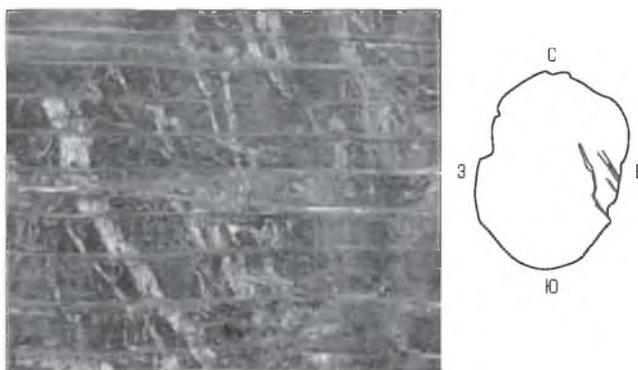
**Рис. 2. Проявление транскарьерного разрывного нарушения в уступах северо-восточного борта карьера +118–(+65) м (а) и –50–(–80) м (б); стрелкой показана его мощность; в – схема разрывного нарушения в пределах карьера**



**Рис. 3. Карбонатитовая дайка в юго-западном борту карьера**

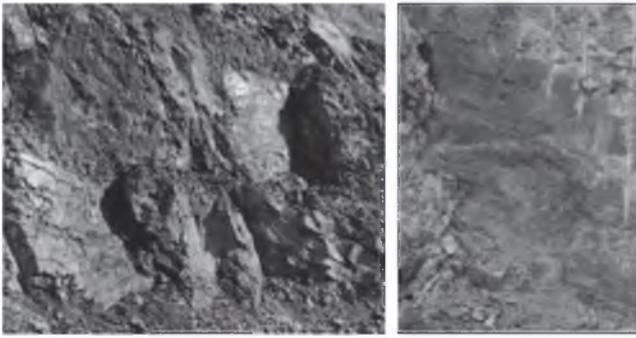


**Рис. 4. Разрывные нарушения в западном борту карьера**



**Рис. 5. Дайки карбонатитов юго-восточного борта карьера**

Наиболее ярко СЗЛ проявляется в западном борту карьера в виде серии параллельных разрывных нарушений с элементами залегания  $\alpha = 219 \div 235^\circ$ ,  $\beta = 309 \div 325^\circ$ ,  $\gamma = 60 \div 82^\circ$  (рис. 4). Поверхности разрывов зачастую притертые со следами скольжения, иногда на них присутствуют следы вторичной минерализации, однако, в отличие от нарушений северо-восточного простирания, они менее извилистые и, как правило, их мощность не превышает 10 см.



**Рис. 6.** Крутопадающие субмеридиональные разрывные нарушения в зоне контакта рудного тела с вмещающими породами

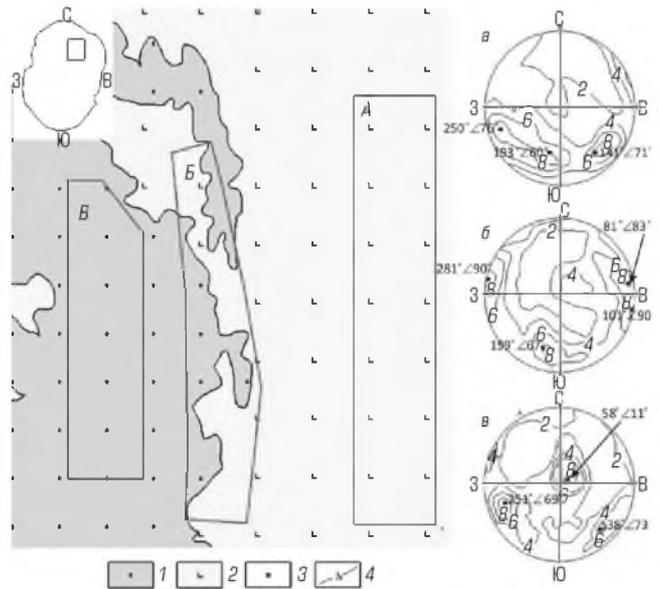
Среди карбонатитовых тел, ориентированных в северо-западном направлении с  $\beta = 324 \div 340^\circ$ , выделяются дайки, проходящие вдоль контакта ийолитов с фенитами юго-восточного борта карьера мощностью от первых метров до 30–40 м (рис. 5).

Изложенное выше доказывает наличие крупных и мелких разрывных структур, согласного с СЗЛ направления, которые по данному признаку можно приурочить к этой крупной региональной структуре.

**Субмеридиональный Кольско-Рейнско-Ливийский линеймент (СМЛ).** Структуры, близкие по простиранию СМЛ, имеют ограниченное распространение и на полярных диаграммах проявлены на северной окраине системы 1 (см. рис. 1). До недавнего времени считалось, что они встречаются только в южной части карьера рудника «Железный», смещая контакты ийолитов с фенитами [11], однако в ходе геолого-структурного картирования 2019 г. установлено, что разрывные нарушения субмеридионального простирания прослеживаются не только вдоль контакта ийолитов с фенитами, но и вдоль контакта рудного тела с вмещающими породами с  $\alpha = 261 \div 275^\circ$ ,  $\beta = 171 \div 185^\circ$  и  $\gamma = 65 \div 85^\circ$ . Они проявляются в виде протяженных зон сближенных трещин, на поверхности которых прослеживаются следы скольжения и иногда вкрапления карбоната (рис. 6). Вполне вероятно, что эти структуры являются рудоконтролирующими, так как четко они прослеживаются только в приконтактной зоне, а на остальных участках карьера либо проявлены локально, либо вовсе отсутствуют.

С целью доказательства этого предположения по замерам трещин северо-восточного борта карьера построены три круговые диаграммы ориентировки трещин: А – во вскрышных породах, удаленных от контакта с рудой на 100–200 м; Б – в приконтактной зоне; В – в рудной зоне (рис. 7).

На диаграмме трещиноватости вскрышных пород (см. рис. 7, а), удаленных от приконтактной зоны на 150–200 м, по пиковым значениям плотности точек (свыше 8 %) выделяются: крутопадающие трещины северо-западного простирания ( $\alpha = 250^\circ$ ,  $\beta = 340^\circ$ ,  $\gamma = 76^\circ$ ), тяготеющие к северо-западному линейменту (СЗЛ); крутопадающие трещины северо-восточного простирания ( $\alpha = 141^\circ$ ,  $\beta = 51^\circ$ ,  $\gamma = 71^\circ$ ), тяготеющие к СВЛ; субширотные трещины с полюсом в точке  $\alpha = 193^\circ$ ,  $\beta = 103^\circ$ ,  $\gamma = 60^\circ$ . Иными словами, на данном участке карьера сохраняется проявление трещиноватости, близкой по ориентировке к региональным линейментам, рассмотренным выше.



**Рис. 7.** Проявление СМЛ на контакте руды с вмещающими породами:

1 – магнетит-апатитовые руды; 2 – пироксениты; 3 – полюсы систем трещин (рядом с точкой их азимутально-угловые характеристики); 4 – изолинии плотности точек измерений, %

Решетка трещиноватости, построенная в зоне контакта рудного тела с вмещающими породами (см. рис. 7, б), резко меняется. На ней трещины северо-западного и северо-восточного простирания, приуроченные к одноименным линейментам, едва прослеживаются, а вместо них ярко проявляются три системы субвертикальных трещин субмеридионального простирания с полюсами в точках с координатами  $\alpha = 281^\circ$ ;  $\beta = 191^\circ$ ;  $\gamma = 90^\circ$ ;  $\alpha = 81^\circ$ ;  $\beta = 171^\circ$ ;  $\gamma = 83^\circ$ ;  $\alpha = 101^\circ$ ;  $\beta = 191^\circ$ ;  $\gamma = 90^\circ$  и субширотного простирания с крутым падением на юго-запад. Сказанное свидетельствует о том, что разрывная тектоника, приуроченная к субмеридиональному линейменту (СМЛ), пересекает и смещает в южном направлении контакты СЗЛ и СВЛ. На это указывает нехарактерный для прямолинейного транскарьерного разрывного нарушения изгиб в районе дна карьера. По юго-западному борту карьера оно идет практически прямолинейно до отметки –54 м, а в противоположном северо-восточному борту карьера оно же от отметки –154 м прямолинейно (с теми же ориентировками) поднимается вверх, однако его начало находится на 100 м южнее того места, которое было получено путем трассировки его следа с юго-западного борта карьера.

По мере удаления от приконтактной зоны к центру рудного тела решетка трещиноватости снова приобретает черты той, что была установлена в породах (см. рис. 7, в). На диаграмме видно, что в рудном теле четко прослеживаются крутопадающие трещины северо-западного ( $\alpha = 251^\circ$ ;  $\beta = 341^\circ$ ;  $\gamma = 69^\circ$ ) и северо-восточного ( $\alpha = 138^\circ$ ;  $\beta = 48^\circ$ ;  $\gamma = 73^\circ$ ) простирания и практически исчезают субмеридиональные трещины. Кроме того, появляются субгоризонтальные трещины северо-восточного падения ( $\alpha = 58^\circ$ ;  $\beta = 148^\circ$ ,  $\gamma = 11^\circ$ ). Из этого следует, что на границе руды с пироксенитами проходит малоизученное тектоническое нарушение, которое с большой долей вероятности сместило контакты транскарьерного разрывного нарушения.

### Выводы

1. На основании анализа данных по изучению трещиноватости прибортового скального массива карьера рудника «Железный» за 1989–2019 гг. доказано, что в нем планетарная трещиноватость проявляется в виде разрывных нарушений, карбонатитовых даек и единичных трещин, направление которых совпадает с региональными линеаментами, господствующими на Кольском полуострове.

2. Северо-восточный линеамент, ориентированный по линии Мурманск–Осло ( $\alpha = 130\div 145^\circ$ ;  $\beta = 40\div 55^\circ$ ;  $\gamma = 70\div 80^\circ$ ), представлен разрывными нарушениями, карбонатитовыми дайками и трещинами с полюсами в точках с координатами  $\alpha = 130^\circ$ ,  $\beta = 40^\circ$ ,  $\gamma = 81^\circ$ ;  $\alpha = 137^\circ$ ,  $\beta = 47^\circ$ ,  $\gamma = 72^\circ$  и  $\alpha = 137^\circ$ ,  $\beta = 47^\circ$ ,  $\gamma = 71^\circ$  соответственно. Ориентировка наиболее мощного транскарьерного разрывного нарушения  $\alpha = 128\div 150^\circ$ ;  $\beta = 38\div 60^\circ$  и  $\gamma = 70\div 85^\circ$ .

3. Линеаменту северо-западного простирания, согласного вытянутости Кольского полуострова ( $\alpha = 215\div 240^\circ$ ;  $\beta = 305\div 330^\circ$ ;  $\gamma = 70\div 80^\circ$ ), наиболее близка по ориентировке система разрывных нарушений, даек и трещин со средними ориентировками  $\alpha = 232^\circ$ ,  $\beta = 322^\circ$ ,  $\gamma = 77^\circ$ ;  $\alpha = 235^\circ$ ,

$\beta = 325^\circ$ ,  $\gamma = 75^\circ$  и  $\alpha = 243^\circ$ ,  $\beta = 333^\circ$ ,  $\gamma = 76^\circ$  соответственно. Эти структуры распространены преимущественно в западном и северо-западном борту карьера.

4. Субмеридиональный Кольско-Рейнско-Ливийский линеамент ( $\alpha = 261\div 275^\circ$ ;  $\beta = 171\div 185^\circ$ ;  $\gamma = 65\div 85^\circ$ ) проявляется локально в зонах контакта фенитов с ийолитами (юго-восточный борт) и рудного тела с пироксенитами (восточный борт). Представлен тектонической зоной в виде крупных субвертикальных трещин со следами скольжения и минерализации на поверхности, полюсы которых на полярной диаграмме находятся в точках с координатами  $\alpha = 281^\circ$ ,  $\beta = 191^\circ$ ,  $\gamma = 90^\circ$ ;  $\alpha = 81^\circ$ ,  $\beta = 171^\circ$ ,  $\gamma = 83^\circ$  и  $\alpha = 101^\circ$ ,  $\beta = 191^\circ$ ,  $\gamma = 90^\circ$ . Скорее всего эта тектоническая зона разрывает плоскость транскарьерного разрывного нарушения и смещает ее на 100 м в южном направлении.

### Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 12, pp. 30–34  
DOI: 10.17580/gzh.2020.12.06

#### Planetary fracturing and lineaments revealed in the Kovdor magnetite–apatite ore deposit by open pit mining

##### Information about authors

I. B. Agarkov<sup>1</sup>, Senior Lecturer, agarkov@bsu.edu.ru

I. M. Ignatenko<sup>1</sup>, Director of the Institute of Earth Sciences, Candidate of Engineering Sciences

V. A. Dunaev<sup>1</sup>, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences

I. S. Kryuchkov<sup>1</sup>, Post-Graduate Students

<sup>1</sup>Belgorod State University, Belgorod, Russia

##### Abstract

The analysis of the studies into fracturing of Zhelezny pit wall rock mass over the period from 1989 to 2019 proves that planetary fracturing is represented by faults, carbonatite dykes and single fractures oriented in the same direction as the prevailing regional lineaments on the Kola Peninsula.

Planetary fracturing is assumed as a system of regular-oriented fractures. The planetary fracturing also includes lineaments of tectonic origin. The scientists think the faults registered in the pit wall rock mass and codirectional with the lineaments will accompany mining operations down to the full depth of the pit, up to the full extraction of magnetite–apatite ore reserves.

While preparing this article, the authors have collected, generalized and analyzed the data of geological and structural mapping implemented by VIOGEM's experts over the period from 1989 to 2019. VIOGEM's procedure of geological and structural mapping ensures continuous documentation of extensional tectonics at high referencing accuracy (to 50 cm), as well as determination of inaccessible azimuths and angles of fractures by remote assessment of their orientations in pit walls using a laser scanner and photographic techniques to study the structure of hard rock mass and the behavior of permanent benches.

**Keywords:** Kovdor deposit, geological and structural mapping, VIOGEM's procedure, planetary fracturing, extensional tectonics, regional lineaments, GIS GEOMIX.

##### References

- Shults S. S. (Ed.). Instructional guidelines on study into planetary fracturing and lineaments. Leningrad : Izdatelstvo Leningradskogo universiteta, 1977. 36 p.
- Lomakin I. E., Anokhin V. I., Shuraev I. V. Planetary lineament network and its possible mechanism. *Tectonophysics and Live Issues of GeoSciences : All-Russian Conference Procedure*. Moscow : IFZ, 2016. Vol. 2. pp. 514–521.

- Butolin A. P., Yanochkin K. A. Planetary tectonic fracturing and its role in the formation of geological environment. *University as a Regional Center for Education, Research and Culture : All-Russian Conference Proceedings*. Orenburg : OGU, 2017. pp. 1132–1134.
- Arkhangel'skaya V.V. Lineament method of the regional metallogenic analysis. *Razvedka i okhrana nedr*. 2008. No. 2. pp. 13–16.
- Azarafza M., Asghari-Kalajahi E., Akgün H. Numerical modeling of discontinuous rock slopes utilizing the 3DDGM (three-dimensional discontinuity geometrical modeling) method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017. Vol. 76, Iss. 3. pp. 989–1007.
- Koronovskiy N. V., Bryantseva G. V., Goncharov M. A., Naimark A. A., Kopaev A. V. Lineaments, planetary jointing, and the regmatic system: main points of the phenomena and terminology. *Geotectonics*. 2014. Vol. 48, No. 2. pp. 151–162.
- Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Australia : CSIRO, 2009. 496 p.
- Vinogradov Yu. A., Asming V. E., Kremenetskaya E. O., Zhironov D. V. Modern seismicity in mining areas in the Murmansk region. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, Iss. 1. pp. 46–52.
- Zhironov D. V., Melikhova G. S., Rybin V. V., Sokharev V. A., Klimov S. A. Peculiarities of the engineering-geological studies of rock masses for designing / redesigning deep open pitsexemplified with the Kovdor deposit of magnetite and apatite ores (Kovdor alkaline-ultrabasic massif, ne of the fennoscandian shield). Part 1. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016. No. 1(24). pp. 15–25.
- Kukharevko A. A. (Ed.). Features of metallogeny of alkali-type formations in the east of the Baltic Shield. Leningrad : Nedra, 1971. 276 p.
- Epshteyn E. M. Geology and petrology model and genetic features of carbonatite-type ore series. Moscow : Nedra, 1994. 255 p.
- Seryi S. S., Agarkov I. B., Kononov A. V., Agarkov N. B. Remote assessment of orientation of fractures in pit's slopes using laser scanners. *Marksheyderiya i nedropolzovanie*. 2016. No. 3(83). pp. 54–57.
- Telling J., Lyda A., Hartzell P., Glennie C. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*. 2017. Vol. 169. pp. 35–68.
- Yanitskiy E. B., Ignatenko I. M., Dunaev A. V. Application of photographic techniques to studying structure of hard rock masses and behavior of permanent benches in surface mines. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*. 2009. No. 1(32). pp. 31–37.
- Reza Yarahmadi, Raheb Bagherpour, Sousa L. M. O., Sayed-Ghahreman Taherian. How to determine the appropriate methods to identify the geometry of in situ rock blocks in dimension stones. *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 74, Iss. 9. pp. 6779–6790.
- Schlottfeldt P., Elmo D., Panton B. Overhanging rock slope by design: An integrated approach using rockmass strength characterisation, large-scale numerical modelling and limit equilibrium methods. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 10, Iss. 1. pp. 72–90.