Geotechnology

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-125-131

# «Кольцевые» структуры как маркирующий признак напряженно-деформированного состояния геосреды

# Л.К. Мирошникова , А.Ю. Мезенцев, Н.В. Семенякина, Н.Е. Филиппова

Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Российская Федерация Mirroshnikova LK@mail.ru

**Резюме:** Рассмотрены инновационные решения по выявлению геодинамических активных структур на основе морфоструктурного анализа осадочных отложений тунгусской серии (карбон-пермь), являющихся верхним этажом локализации рудоносных массивов и богатых сульфидных платиносодержащих медно-никелевых руд. Выделенные на схемах изолинейного распределения кровли и почвы тунгусской серии морфоструктурные группы овальных очертаний рассмотрены как маркирующий признак развития «кольцевых» структур. Данные структуры развиты вдоль границ шахтных полей. Формирование их происходило в период, последующий рудообразованию. Отдельные тектонические нарушения, развитые внутри «кольцевых» структур и вдоль их границ, находят отклик на глубине залегания рудоносных интрузий и рудных тел. «Кольцевые» структуры сформировались на юго-западной части Талнахского рудного узла в результате левосторонних сдвигов, которые сопровождались кручением с разворотом к востоку. «Кольцевые» структуры – морфотектонические блоки отличаются максимальными показателями напряженности. В результате исследований было установлено, что «кольцевые» структуры являются маркирующими признаками геодинамически активных структур сдвиговой и взбросо-сдвиговой кинематики с высокой плотностью дизъюнктивных нарушений, в которых возможны высокие риски развития опасных геодинамических процессов и явлений в пространстве, прилегающем к шахтным полям.

*Ключевые слова:* Талнахский рудный узел, локальное геодинамическое районирование, геодинамически активные зоны, «кольцевые» структуры, шахтные поля

**Для цитирования:** Мирошникова Л.К., Мезенцев А.Ю., Семенякина Н.В., Филиппова Н.Е. «Кольцевые» структуры как маркирующий признак напряженно-деформированного состояния геосреды. *Горная промышленность*. 2022;(3):125–131. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-125-131

# "Ring" structures as a marking sign of the stress-strain state of the geo-medium

L.K. Miroshnikova , A.Yu. Mezentsev, N.V. Semenyakin, N.E. Filippova Polar State University named after N.M. Fedorovsky, Norilsk, Russian Federation miroshnikova\_LK@mail.ru

*Abstract:* Innovative solutions for identifying geodynamically active structures based on the morphostructural analysis of sedimentary deposits of the Tunguska series (Carboniferous-Permian), which are the upper level of the localization of ore-bearing massifs and rich sulfide platinum-bearing copper-nickel ores, are considered. The morphostructural groups of oval outlines identified on the isolinear distribution schemes of the top and bottom of the Tunguska series are considered as a marker of the "ring" structures development. These structures are developed along the boundaries of mine fields. Their formation took place in the period following the ore formation. Individual tectonic disturbances developed inside the "ring" structures and along their boundaries can be traced down to the occurrence depth of the ore-bearing intrusions and ore bodies. The "ring" structures were formed in the southwestern part of the Talnakh ore cluster as a result of left-sided strike-slip faults, which were accompanied by east-bound torsions. The "ring" structures are morphotectonic blocks that are distinguished by maximum tension indicators. As a result of the research, it was found that the "ring" structures are the marking signs of geodynamically active structures of the strike-slip and the oblique-slip kinematics with a high density of disjunctive disturbances, in which high risks in development of dangerous geodynamic processes and phenomena are possible in zones adjacent to the mine fields.

Keywords: Talnakh ore cluster, local geodynamic zoning, geodynamically active zones, "ring" structures, mine fields

*For citation:* Miroshnikova L.K., Mezentsev A.Yu., Semenyakin N.V., Filippova N.E. "Ring" structures as a marking sign of the stress-strain state of the geo-medium. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):125–131. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-125-131

# Geotechnology

## Введение

Актуальностью работы является выявление маркирующих признаков геодинамически активных зон, внутри которых выделяются области высоконапряженных горных пород и нестабильное состояние геологической среды.

Основной целью локального геодинамического районирования в пределах Талнахского рудного узла является установление пространственного соответствия выделенных в горном массиве вмещающей толщи отложений тунгусской серии блоков напряженных зон (ТНЗ) аномально активным зонам геодинамической природы, которые проявляются на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях [1; 2], отрицательно влияющих на безопасность ведения горных работ.

На основе методических рекомендаций по геодинамическому районированию в работе решается задача установления местоположения потенциально геодинамически опасных участков на основе комплекса методов морфоструктурного, структурно-геологического анализа и признаков изменчивости подземного строения геологической среды [3–9] осадочных отложений тунгусской серии, которые являются «верхним» этажом внедрения рудоносных интрузий.

Предметом исследования являются геометрические формы – «кольцевые» структуры, выделенные на схемах картографической оцифровки точек (изопахит), и абсолютные глубины залегания подошвы осадочных отложений тунгусской серии.

#### Методы исследования

Разработки по локальному прогнозированию геодинамически активных зон выполнялись согласно рекомендациям И.М. Батугиной, А.С. Батугина и И.М. Петухова и др. [3–6], которые предлагают в качестве одного из признаков присутствия блоков тектонически напряженных зон (ТНЗ) рассматривать «кольцевые» структуры, которые были выделены на морфоструктурных схемах исследуемых территорий.

Работы выполнены с использованием материалов детальной разведки ПО «Норильскгеология», проводимой с 1972 по 2002 г., на основании которых были отстроены цифровые модели отдельно по горизонтам подошвы и кровли отложений тунгусской серии.

Морфологические схемы масштаба 1: 25 000 подошвы и кровли отложений тунгусской серии отстроены по геологическим данным буровых скважин с последующей компьютерной обработкой методом Auto CAD 2012. Детальность оцифровки рельефа подошвы и кровли отложений соответствует шагу построения изолиний: для подошвы 25 м, для кровли 20 м. Интерпретация графических построений проводилась с привлечением структурно-тектонических схем ТРУ, составленных А.В. Тарасовым и В.Ф. Кравцовым [10], и которые уточнялись и детализировались авторами на основе последних данных детальной разведки.

В работе рассматривается возможность определения положения геодинамически активных структур по комплексу выявленных морфологических элементов толщи осадочных отложений тунгусской серии (карбон-пермь), которые окончательно были сформированы в ходе тектонических процессов на заключительных этапах лавовых излияний и формирования рудных тел.

#### Результаты исследования

В «Руководстве по геодинамическому районированию шахтных полей» И.М. Батурина отмечает: «при морфо-

структурном анализе особое значение необходимо уделять признакам наличия кольцевых и купольных структур, которые напрямую отражают глубинные формы развития элементов геологической среды и характеризуют развитие в недрах различных форм неравновесных процессов» [6]. На первом этапе были построены цифровые модели по отметкам кровли и почвы отложений тунгусской серии. Далее на их основе отстраивались морфоструктурные схемы, при анализе которых были отмечены основные морфоструктурные элементы южной части ТРУ (рис. 1, 1). На схемах наряду с участками с повторяющимися элементами структур почвы и кровли с некоторым смещением их



#### Рис. 1

Морфоструктурная схема и анализ признаков геодинамической нестабильности недр по картине изолинейного распределения изолиний кровли отложений тунгусской серии: 1 – изопахиты отложений тунгусской серии; 2 – изолинии абсолютных глубин отложений тунгусской серии: 3 – границы полей шахт и рудников; 4 – контур границ распространения «кольцевых» структур; 5 – зона Главного шва Норильско-Хараелахского разлома; 6 – предполагаемые тектонические нарушения, выделенные на основе анализа структурных элемен-тов на морфоструктурных схемах; 7 – скважины детальной разведки; 8 – линии профилей

# Fig. 1

Morphostructural map and analysis of subsoil geodynamic instability indicators based on the isolinear distribution pattern of the top sediments of the Tunguska series: 1 – isopach lines of the Tunguska series; 2 - true vertical depth isolines of the Tunguska series; 3 – boundaries of the mineral and metal mine fields; 4 – boundaries of the "ring" structures; 5 - zone of the Main Geosuture of the Norilsk-Kharaelakh fault: 6 – assumed tectonic disturbances based on analysis of structural elements in the morphostructural map; 7 – detailed exploration boreholes; 8 - profile lines

Geotechnology



Рис. 2 Морфоструктурная схема и анализ признаков геодинамической нестабильности недр по картине изолинейного распределения абсолютных отметок подошвы отложений тунгусской серии (условные обозначения на рис. 1)

# Fig. 2

Morphostructural map and analysis of subsoil geodynamic instability indicators based on the isolinear distribution pattern of the true vertical depth of the Tunguska series top sediments (see the legend in Fig.1)

осей отмечаются участки с противоположными знаками почвы и кровли. В южной части ТРУ отчетливо прослеживаются морфоструктурные группы овальных очертаний, которые являются маркирующим признаком развития «кольцевых» структур [6] и которые формируют гряды с многократно повторяющимися подобными морфоструктурными группами, обрамленными дугообразными тектоническими зонами (рис. 1, 2). Данные «кольцевые» структуры имеют эндогенное происхождение и относятся к классу тектоногенных.

Разрывные нарушения, выявленные на территории ТРУ, сформировались в несколько тектонических циклов. В послеинтрузивный этап в результате напряжений сжатий происходило образование серии левосторонних сдвигов с амплитудой 600-700 м. Кроме того, очевидно, при образовании в юго-западной части ТРУ «кольцевых» структур отмечался момент кручения, при котором южная часть ТРУ сдвигалась с разворотом к востоку [9–11]. Очевидно, определяющими деформационными процессами в геосреде являются дизъюнктивные, которые проявились на последних этапах излияния и распределения лавовых потоков во время последующего формирования во вмещающей осадочной толще месторождений, так как сдвижению подвергались и интрузивные тела. По данным детальной разведки [10] сформированные крупные разрывные нарушения третьего порядка определяют структурно-тектонические условия рудных полей (рис. 3).



#### Рис. З

Геологический разрез (масштаб 1: 25 000) (по материалам ПО «Норильскгеология», 2002 г.): 1 - четвертичные отложения (Q); 2-6 - эффузивные образования перми-триаса (Р<sub>2</sub> – Т<sub>1</sub>): 2 – моронговская свита (T<sub>1</sub>mr), базальты полифировые, гломеропорфировые; 3 – надеждинская свита (T₁nd), базальты порфировые: 4 – гудчихинская свита (T₁gd), базальты порфировые, пикритовые; 5 – сыверминская свита (T<sub>1</sub>sv), базальты толеитовые:

6 – ивакинская свита (P<sub>2</sub>iv), трахидолериты и долериты с титанистым авгитом, базальты лабрадоровые, двуполевошпатовые;

7 – карбон – верхняя пермьтунгусская серия ( $C_2 - P_2$ ), терригенные,

алюмосиликатные отложения: переслаивание песчаников, алевролитов, углистых аргиллитов;

8 – девон верхний-средний (D<sub>2-3</sub>), карбонатные отложения; 9 – девон средний,

мантуровская свита (D₂mt), тип разреза сульфатно-

карбонатный: переслаивание мергелей, доломитов,

ангидритов с линзами солей; 10–11 — девон нижний:

10 – разведочнинская свита (D1rz), аргиллиты;

11 – курейская свита (D<sub>1</sub>kr), мергели, известковистые доломиты:

12 – зубовская свита (D<sub>1</sub>rz), мергели с гнездами и прослоями ангидритов и гипсов:

13 – рудоносная интрузия габбродолеритов;

14 — горизонты богатых руд; 15 — Норильско-Хараелахский разлом;

16 – разломы третьего и четвертого порядков

#### Fig. 3

Geological cross-section at the 1:25,000 scale (based on materials of Norilskgeologiya Production Association, 2002): 1 – Quaternary sediments (Q); 2–6 – effusive Triassic and Permian blanket ( $P_2 - T_1$ ): 2 – Morongov Series ( $T_1$ mr), polyphyric and glomeroporphyric basalts; 3 – Nadezhdinskaya Series (T1nd), porphyric basalts; 4 – Gudchikhinskaya Series

(T<sub>1</sub>gd), porphyric and picrite basalts; 5 – Syverminskaya Series

 $(T_1sv)$ , tholeitic basalts; 6 – Ivakinskaya Series ( $P_2iv$ ), trachydolerites and dolerites with titanian augite, labradorite and two-feldspar

basalts; 7 – Carboniferous – Upper

Permian, Tunguska series (C<sub>2</sub> – P<sub>2</sub>) terrigenous aluminosilicate sediments: interbedded sandstones, aleurolites, carbon-bearing argillites;

8 – Upper-Middle Devonian (D<sub>2-3</sub>), carbonate sediments; 9 – Middle Devonian.

Manturovskaya Series (D<sub>2</sub>mt), sulphate-carbonate type of the geological settings: interbedded marls, dolomites,

anhydrites with salt lenses; 10–11 – Lower Devonian:

10 – Razvedochinskaya Series (D<sub>1</sub>rz), argillites;

11 – Kureyskaya Series (D<sub>1</sub>kr), marls, calciferous dolomites;
12 – Zubov Series (D<sub>1</sub>rz), marls with pockets and interbeds of anhydrites and gypsum;
13 – ore-bearing intrusion of gabbro-dolerites;

14 – high-grade ore layers; 15 – Norilsk-Kharaelakh fault; 16 – third- and fourth-order faults

Geotechnology

Таблица 1 Расчет тектонической ступени при оконтуривании «кольцевых» структур Table 1 Calculation of the tectonic step in outlining the "ring" structures

Объект	Изопахиты мощности отложений тунгусской серии			Абсолютные отметки глубин подошвы отложений тунгусской серии		
	Максимальная, м	Минимальная, м	Тектоническая ступень <i>h</i> , м	Максимальная, м	Минимальная, м	Тектоническая ступень <i>h</i> , м
Граница шахтных полей рудника «Таймырского» и шахты «Комсомольской»	400	160	24,0	-750	-500	25,0
Граница шахтных полей шахты «Комсомольской» и шахты «Маяк»	260	40	22,0	-400	-150	25,0



Морфотектонические блоки «кольцевых» структур являются природными границами шахтных полей и прослеживаются вдоль южной границы поля рудника «Таймырский» на контакте с полем шахты «Комсомольская», восточной границы поля шахты «Комсомольская» и северной границы поля шахты «Маяк».

Для определения границ геодинамических блоков «кольцевых» структур с различными уровнями высот на морфоструктурных схемах масштаба 1:25 000 и профилях применялся метод расчёта численного значения тектонической ступени (табл. 1) [6; 9]:

# $h = 0.1 \cdot (H_{\max} - H_{\min})$ ,

где  $H_{\text{max}}$  – минимальная отметка изопахиты (или подошвы) отложений тунгусской серии;  $H_{\min}$  – максимальная отметка изопахиты (или подошвы) отложений тунгусской серии; h – тектоническая ступень

Последующее уточнение границ «кольцевых» структур произведено при построении профилей вкрест простирания и по простиранию структур. В профилях отмечается, что «кольцевые» геодинамические блоки в морфоструктурном плане южной части ТРУ формируют палеорельеф тунгусской серии прерывисто-грядового типа дугообразной формы. Срывы по поверхностям деформаций в блоках «кольцевых» структур характеризуются как надвиги и взбросы и ограничены бортами флексур Каейркан-Пясинского поднятия и Норильско-Хараелахского разлома (флексуро-сброса), где происходила разрядка сдвиговых напряжений. Породы рамы по разным бортам блоков сдвинуты. Снизу данные структуры ограничиваются межслоевыми сбросо-сдвигами. Окаймляющие блоки разрывы распадаются на несколько ветвящихся мелкоамплитудных нарушений, определяя чешуйчатый характер строения структурных блоков [10]. В результате образуются клиновидные тектонические блоки, оторванные от основных структур (флексуры, синклинали, поднятия),



которые выделяются в морфоструктурном плане отложений тунгусской серии.

Рассматриваемые «кольцевые» структуры – морфотектонические блоки, в которых напряженно-деформированное состояние геосреды характеризуется неоднородным распределением физико-механических свойств и контрастными показателями напряженности [12].

В процессе образования кольцевых структур происходит усиление тектонических сжимающих напряжений, уплотнение геосреды и перераспределение действующих в окрестнос-тях шахтных полей напряжений [9; 13–16]. Для исследования неоднородности в природном поле напряжений отложений тунгусской серии использовались данные по 150 скважинам детальной разведки.

Расчет напряжения в горном массиве тунгусской серии [6; 9] определялся А.Н. Динником по формуле:

$$\sigma_x = \sigma_z = \lambda \gamma H$$

где  $\lambda = \mu/(1-\mu)$  – коэффициент бокового распора, или коэффициент Динника; *H* – мощность отложений, м;  $\gamma$  – удельный вес породы, г/см<sup>3</sup>;  $\mu$  – модуль упругости, Па.

После определения  $\sigma_x$  рассчитывалось численное значение коэффициента К распределения напряжения по формуле:

$$K = \sigma_i / \sigma_{cp}$$

где  $\sigma_i$  – значение напряжения по определенной скважине;  $\sigma_{cp}$  – среднее значение напряжения в пределах шахтного поля.

Полученные численные значения *К* были сгруппированы в классы: *К* = до 0.9, *К* = 0.9–1.5, *К* = 1.5–2.0, *К* = 2.0–2.6, *K* = 2.9–3.0, *K* = 3.1–3.6.

Максимальные значения *К* – от 3.6 до 2.6 наблюдаются на границе раздела шахтных полей, где преобладают кольцевые структуры, в которых концентрация изолиний и зон интенсивности поля напряжений согласуется с максимальной мощностью отложений тунгусской серии (рис. 4–7).

Geotechnology



#### Рис. 4

разведки

Профиль I–I вдоль простирания «кольцевой» структуры: 1–6 – численное значение коэффициента К распределения напряжения; 7 – предполагаемые разрывные нарушения; 8 – Норильско-Хараелахский разлом; 9 – проекция рудных тел на

горизонтальную плоскость;

10 – скважины детальной

Fig. 4

- Profile I–I along the strike of the "ring" structure: 1–6 – numerical value of the stress distribution coefficient (K);
- 7 assumed discontinuities;
  8 Norilsk-Kharaelakh fault;
  9 projection of the ore bodies on the horizontal
- plane; 10 – detailed exploration
- boreholes





Fig. 5 Profile II–II along the strike of the "ring" structures



Рис. 6 Профиль III–III по простиранию «кольцевых» структур

Fig. 6 Profile III–III along the strike of the "ring" structures



Рис. 7 Профиль IV–IV вкрест простирания структуры шахтного поля шахты «Маяк»

Profile IV–IV across the strike of the Mayak mine field structure

# Выводы

Анализ признаков геодинамической нестабильности недр производился по морфоструктурным схемам изолинейного распределения мощностей и подошвы отложений тунгусской серии. В предлагаемой статье впервые при локальном геодинамическом районировании территории ТРУ рассмотрены вопросы выделения «кольцевых» структур эндогенного происхождения тектоногенного класса как объектов нестабильного состояния недр.

При локальном районировании на схемах в границах юго-западной территории ТРУ были выделены морфоструктурные группы овальных очертаний. Данная особенность рассматривалась как маркирующий признак развития «кольцевых» структур, характеризующихся прерывистым строением. Границы распространения морфоструктурных групп имеют дугообразное очертание.

# Geotechnology

Выделенные «кольцевые» структуры на площади ТРУ являются маркирующими признаками геодинамически активных структур сдвиговой и взбросо-сдвиговой кинематики с высокой плотностью дизъюнктивных нарушений, в которых возможны высокие риски развития опасных геодинамических процессов и явлений.

Предполагаемые разрывные нарушения на профилях представляют собой конусовидные пучки, имеющие «бескорневой», «навешанный» характер разнонаправленных и разноамплитудных нарушений [10], которые, очевидно, с глубиной объединяются сферическими плоскостями межслоевых разломов. Разгрузка граничных тектонических «кольцевых» структур происходит в зоне Норильско-Хараелахского разлома (или флексуро-сброса) и в килевой части Кайеркан-Пясинского поднятия.

Образование структур, очевидно, происходило в последний тектонический цикл, инициированного излиянием лав моронговско-мокулаевского времени нижнего триаса в период последующего формирования рудоносных интрузий и связанных с ними сульфидных платиносодержащих медно-никелевых руд. Границы развития «кольцевых» морфоструктурных блоков прослеживаются вдоль границ шахтных полей.

При дальнейших исследованиях будет детально рассмотрен вопрос о пространственном взаимоотношении разрывных нарушений, выделенных при морфоструктурном анализе отложений тунгусской серии с тектоникой рудных тел.

## Список литературы

1. Галаов Р.Б., Кисель А.А., Андреев А.А., Зубков В.В. Оценка напряженного состояния рудного массива залежи С-2 шахты «Скалистая» до начала очистных работ. Горный журнал. 2016;(7):10–14. https://doi.org/10.17580/gzh.2016.07.02

2. Еременко А.А., Дарбинян Т.П., Айнбиндер И.И., Конурин А.И. Оценка геомеханического состояния массива горных пород на Талнахском и Октябрьском месторождениях. *Горный журнал.* 2020;(1):82–86. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.16

3. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамическое районирование недр. Л.: ВНИМИ; 1990. 129 с.

4. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. 2-е изд. М.: Недра Коммюникейшенс ЛТД; 1999. 256 с.

5. Батугина И.М., Батугин А.С., Петухов И.М. и др. ИЗОС-333 Корректировка карт геодинамического районирования недр, построенных в 1986–88 гг., в связи с модернизацией методики их построения: отчет о научно-исследовательской работе. М.: МГГУ; 2004. 33 с.

6. Батугина И.М. и др. Руководство по геодинамическому районированию шахтных полей. СПб.: ВНИМИ; 2012. 114 с.

7. Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В. Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений. *Горный журнал.* 2020;(1):49–52. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.09

8. Лань Т., Чжан Х., Ли Ш., Ватутин А.С., Чжао В., Ли Ц., Сунь Ц. Применение и развитие метода геодинамического районирования по прогнозу геодинамической опасности на угольных шахтах Китая. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2018;(6):71–76. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-71-76

9. Мирошникова Л.К., Мезенцев А.Ю., Кадыралиева Г.А., Перепелкин М.А. Геодинамическое районирование Талнахской тектономагматической системы. *Горная промышленность*. 2021;(6):103–109. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-103-109

10. Тарасов А.В. О типизации структурных элементов норильских медно-никелевых месторождений. В кн.: *Геология и полезные ископаемые Норильского района, II Норильская геологическая конференция.* Норильск: Изд-во Норильского ГМК; 1971. С. 150–153.

11. Мирошникова Л.К., Мезенцев А.Ю., Семенякина Н.В., Котельнокова Е.М. Геодинамически активные структуры западного фланга Талнахского рудного узла. *Горная промышленность*. 2020;(3):105–113. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-105-112 12. Стажевский С.Б. О вкладе кольцевых структур в напряженно-деформированное состояние литосферы и металлогению. *Физическая мезомеханика*. 2005;8(1):65–70.

13. Лукичев С.В., Семенова И.Э., Земцовский А.В., Громов Е.В. Определение границ охранных целиков в тектонически напряженных массивах. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019;(2):19–28. https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.19-27

14. Осипова Е.Б. Гравитационные напряжения и слоисто-блоковые структуры в земной коре. Физическая мезомеханика. 2021;(6):105–115. https://doi.org/10.24412/1683-805X-2021-6-105-115

15. Ливинский И.С., Митрофанов А.Ф., Макаров А.Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность. *Горный журнал.* 2017;(8):51–55. https://doi.org/10.17580/gzh.2017.08.09

16. Stacey T.R. Rock engineering design – the importance of process, prediction of behaviour, choice of design criteria, review and consideration of risk. In: Y Potvin (ed.), *Design Methods 2015: Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2015. pp. 57–76. https://doi.org/10.36487/ACG\_rep/1511\_0.4\_ Stacey

## References

1. Galaov R.B., Kisel A.A., Andreev A.A., Zubkov V.V. Pre-stoping assessment of stress state of ore body S-2 in Skalistaya Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(7):10–14. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2016.07.02

2. Eremenko A.A., Darbinyan T.P., Aynbinder I.I., Konurin A.I. Geomechanical assessment of rock mass in the Talnakh and Oktyabrsky deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):82–86. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.16

3. Petukhov I.M., Batugina I.M. *Geodynamic zoning of underground resources*. Leningrad: VNIMI; 1990. 129 p. (In Russ.)

4. Petukhov I.M., Batugina I.M. *Geodynamics of underground resources*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Nedra Kommyunikeishens LTD; 1999. 256 p. (In Russ.)

# Geotechnology

5. Batugina I.M., Batugin A.S., Petukhov I.M. et al. *IZOS-333 Correction of geodynamic zoning maps of underground resources, produced in 1986-88 due to improvement of the plotting methodology: report on scientific research activities.* Moscow: Moscow State Mining University; 2004. 33 p. (In Russ.)

6. Batugina I.M. et al. Guidance on geodynamic zoning of mine fields. St. Petersburg: VNIMI; 2012. 114 p. (In Russ.)

7. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V. Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):49–52. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.09

8. Lan T., Zhang H., Li S., Batugin A.S., Zhao W., Li Q., Sun S. Application and development of the method of geodynamic zoning for forecasting the geodynamical danger at coal mines of China. Proceedings of higher educational establishments. *Geology and Exploration*. 2018;(6):71–76. (In Russ.) https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-71-76

9. Miroshnikova L.K., Mezentsev A.Yu., Kadyralieva G.A., Perepelkin M.A. Geodynamic zoning of the southwestern part of the Talnakh Orogenic System. *Russian Mining Industry*. 2021;(6):103–109. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-103-109

10. Tarasov A.V. Typification of structural elements of Norilsk copper and nickel deposits. In: *Geology and mineral resources of Norilsk Region, 2<sup>nd</sup> Norilsk Geological Conference*. Norilsk: Norilsk Mining and Metallurgical Combine; 1971, pp. 150–153. (In Russ.)

11. Miroshnikova L.K., Mezentsev A.Yu., Semenyakina N.V., Kotelnikova E.M. Geodynamically Active Structures of Western Flank of Talnakh Orogenic System. *Russian Mining Industry*. 2020;(3):105–112. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-105-112

12. Stazhevskii S.B. On the contribution of ring structures to the stress-strain state of the lithosphere and to metallogeny. *Physical Mesomechanics Journal*. 2005;8(1):65–70. (In Russ.)

13. Lukichev S.V., Semenova I.E., Zemtsovskii A.V., Gromov Ye.V. The Definition of the Protective Pillar Boundaries in Tectonically Stressed Rock Masses. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2019;(2):19–28. (In Russ.). https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.19-27

14. Osipova E.B. Gravitational stresses and layered blocky structures in the earth's crust. *Physical Mesomechanics Journal*. 2021;(6):105–115. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/1683-805X-2021-6-105-115

15. Livinskiy I.S., Mitrofanov A.F., Makarov A.B. Complex geomechanical modeling: structure, geology, reasonable sufficiency. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(8):51–55. (In Russ.).https://doi.org/10.17580/gzh.2017.08.09

16. Stacey T.R. Rock engineering design – the importance of process, prediction of behaviour, choice of design criteria, review and consideration of risk. In: Y Potvin (ed.), *Design Methods 2015: Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining.* Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2015. pp. 57–76. https://doi.org/10.36487/ACG\_rep/1511\_0.4\_ Stacey

## Информация об авторах

Мирошникова Людмила Константиновна – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Российская Федерация; e-mail: miroshnikova\_ LK@mail.ru

**Мезенцев Александр Юрьевич** – ассистент, аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Российская Федерация; e-mail: kingmezencev@ mail.ru

Семенякина Наталия Вячеславовна – аспирант, старший преподаватель кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Российская Федерация

Филиппова Наталия Евгениевна – доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Российская Федерация

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 04.05.2022 Поступила после рецензирования: 23.05.2022 Принята к публикации: 24.05.2022

## Information about the authors

**Lyudmila K. Miroshnikova** – Dr. Sci. (Geolog. & Mineral.), Professor, Department of Mineral Deposit Development, Polar State University named after N.M. Fedorovsky, Norilsk, Russian Federation; e-mail: miroshnikova lk@mail.ru.

Aleksandr Yu. Mezentsev – Post-Graduate Student, Senior Lecturer, Department of Mineral Deposit Development, Polar State University named after N.M. Fedorovsky, Norilsk, Russian Federation; e-mail: kingmezencev@mail.ru.

**Natalia V. Semenyakin** – Post-Graduate Student, Senior Lecturer, Department of Mineral Deposit Development, Polar State University named after N.M. Fedorovsky, Norilsk, Russian Federation

**Natalia E. Filippova** – Associate Professor Department of Mineral Deposit Development, Polar State University named after N.M. Fedorovsky, Norilsk, Russian Federation

## Article info

Received: 04.05.2022 Revised: 23.05.2022 Accepted: 25.05.2022