

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.90>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД РУДНОГО ТЕЛА ГЛУБОКОЕ ЗУН-ХОЛБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Научная статья

**Павлов А.М.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-6239-7005;

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (pavlov-gp[at]rambler.ru)

**Аннотация**

Крутопадающее, маломощное рудное тело Глубокое Зун-Холбинского месторождения разрабатывается подземным способом. В настоящее время горные работы по вскрытию и подготовке к добыче руды ушли ниже отметки гор, +1080 м, на глубину 1100 м от поверхности рельефа, что сопровождается изменением природных напряжений массива горных пород. Балансовые запасы рудного тела Глубокое залегают в сложных условиях геологической среды. С целью эффективного управления горным давлением, специалистами ИРНТУ были проведены исследования геомеханического состояния массива горных пород на вскрываемых ярусах блоков рудного тела. В результате выполненных работ была уточнена геология и тектоника массива горных пород, их физико-механические свойства. Определена степень устойчивости пород от «средней» до «неустойчивой». По результатам натурных измерений на станциях щелевой разгрузки установлены закономерности распределения первоначальных природных напряжений. Распределение напряжений в массиве горных пород рудного тела Глубокое носит отчетливо выраженный гравитационно-тектонический характер. С помощью программы математического моделирования методом конечных элементов FEM исследованы техногенные напряжения в массиве вокруг выработок. Выявлены закономерности распределения техногенных напряжений в элементах выработок. Определена зона разрушающих напряжений и зона опорного давления. Техногенные напряжения в массиве пород вокруг выработок превышают допустимые. Горные выработки требуют крепления. Визуальное обследование состояния горных выработок показало, что присутствует статическое горное давление, а динамического проявления горного давления не выявлено. По результатам проведенных исследований даны рекомендации по ведению горных работ на основе определенных параметров при разработке рудного тела Глубокое.

**Ключевые слова:** крутопадающее рудное тело, подземная разработка, природные напряжения, техногенные напряжения, опорное давление.

**A STUDY OF THE GEOMECHANICAL STATE OF THE ROCK MASS OF THE ORE BODY OF THE GLUBOKOYE ZUN-KHOLBINSKOYE ORE DEPOSIT**

Research article

**Pavlov A.M.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-6239-7005;

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

\* Corresponding author (pavlov-gp[at]rambler.ru)

**Abstract**

The high-dipping, low power Glubokoye ore body of the Zun-Kholbinskoye deposit is developed by underground mining. At present, mining operations for stripping and preparation for ore extraction have gone below the mountain level, +1080 metres, to a depth of 1100 metres from the relief surface, which is accompanied by changes in the natural stresses of the rock mass. The balance reserves of the Glubokoye ore body lie in complex conditions of the geological environment. In order to effectively manage rock pressure, specialists of IRNITU carried out research of geomechanical condition of rock mass at the uncovered tiers of blocks of the ore body. As a result, the geology and tectonics of the rock mass and their physical and mechanical properties were clarified. The degree of rock stability was determined from "average" to "unstable". Based on the results of field measurements at the slotted unloading stations, the distribution patterns of initial natural stresses were established. The distribution of stresses in the rock mass of the Glubokoye ore body has a clearly expressed gravitational and tectonic character. Using the FEM finite element mathematical modelling software, the technogenic stresses in the rock mass around the mine workings were studied. Regularities of anthropogenic stress distribution in the elements of excavations are identified. The zone of destructive stresses and the zone of supporting pressure are determined. Technogenic stresses in the rock mass around the mine workings exceed the permissible ones. The mine workings require fixing. Visual inspection of the mine workings showed that static rock pressure is present, and no dynamic manifestation of rock pressure was detected. Based on the results of these studies, recommendations were given on mining operations based on certain parameters during the development of the Glubokoye ore body.

**Keywords:** high-dipping ore body, underground mining, natural stresses, anthropogenic stresses, bearing pressure.

## **Введение**

Зун-Холбинское золоторудное месторождение расположено на территории Бурятии, в юго-восточной части Восточных Саян. Разработка балансовых запасов ведется на глубинах более 1000 м от поверхности горного рельефа.

Рудное тело Глубокое приурочено к юго-восточной части месторождения и представляет собой маломощную крутопадающую минерализованную зону, которая состоит из фрагментов в различной степени золотоносных геологических образований – кварцитов, лиственитов, кварц-сульфидных и сульфидных руд, соединенных березитизированными породами. Эти фрагменты, как правило, не имеют четких границ с вмещающими породами и условно целостные рудные тела выделяются только на основании данных опробования в линейных разрывных структурах, контролирующей рудоносную зону в целом. Контакты между породами представлены системами разломов, в основном 70-72° углом падения на ЮВ. Разлом представлен перетертым материалом (глинка трения) и углеродистыми сланцами. Рудное тело имеет юго-восточное (100-122°) простираие с падением 80-88° на юго-запад приурочено к зоне Перспективной Зун-Холбинского разлома, расположено в центре Гарганской глыбы [1]. Массив горных пород рудного тела Глубокое можно классифицировать категориями среднеустойчивый и неустойчивый (70%).

Балансовые запасы рудного тела вскрываются двумя съездами, от которых проходятся квершлага, разделяющие через 15 м по вертикали этаж на яруса. Подготовка осуществляется рудными штреками под камерную систему разработки с сухой закладкой выемочного пространства и торцовым выпуском руды. Горные работы ведутся с применением самоходного оборудования.

Рудное тело Глубокое разрабатывается на больших глубинах, где проявляется горное давление в виде вывалов с бортов и кровли выработок и сопровождается при добыче повышенном разубоживанием руды. Созрела необходимость более глубоко изучить геомеханическое состояние массива горных пород с целью обоснования эффективных параметров геотехнологии при разработке балансовых запасов рудного тела Глубокое.

## **Методы и принципы исследования**

Физико-механические свойства горных пород рудного тела Глубокое определялись на основе испытаний керна геологоразведочных скважин по семи пробам, в соответствии с принятыми стандартами России. Показатели, полученные в ходе испытаний физико-механических свойств образцов пород, использовались для дальнейших геомеханических расчетов определения состояния массива в районе горных выработок.

При определении устойчивости обнажений пород использовался пространственно-статистический анализ тектонических структур по фотографиям керна разведочных скважин [2], [3].

Исследование первоначальных природных напряжений производили с использованием метода целевой разгрузки по методике института горного дела УрО РАН [4], [5], получив в результате значения гравитационных и тектонических природных напряжений в массиве горных пород рудного тела Глубокое.

Комбинированная методика инженерных расчетов и моделирования состоит из инженерного расчета техногенных напряжений с использованием зависимостей В.Ф. Трумбачева, Г.А. Каткова, Д.И. Беккера, Н.П. Влоха, А.В. Зубкова, Л.И. Сосновского, с отдельным определением коэффициентов концентрации напряжений [6], [7] на основе конечно-элементного моделирования с использованием программы FEM, разработанной ИГД УрО РАН [8], [9]. В результате получены зависимости изменения напряжений подрабатываемого массива и целиков, горных выработок [10], которые использовались для обоснования параметров геотехнологии разработки балансовых запасов.

Для дальнейшего сравнения с полученными результатами проведенных исследований геомеханического состояния массива горных пород был применен метод натурного визуального обследования состояния горных выработок рудного тела Глубокое с видеофиксацией.

## **Обсуждение результатов исследований**

Рудное тело Глубокое, в районе ведения горных работ: +1000 м представлено минерализованной зоной в виде тонких кварц-сульфидных прожилков (0.05-0.1 м), осложненную разно ориентированными трещинами (см. рисунок 1). Рудное тело залегает в измененных гранодиоритах, расположенных в пачке известняков. Гранодиориты можно охарактеризовать как среднеустойчивые породы, на контакте с известняками наблюдается интенсивная трещиноватость (10-15 трещин на 1 п.м.).



Рисунок 1 - Минерализованная зона  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.90.1>

Висячий борт представлен интенсивно расланцованными измененными гранодиоритами (количество трещин 7-10 на 1 п.м.). Рудное тело можно охарактеризовать как неустойчивое, склонное к самообрушению на контакте с измененными гранодиоритами (висячий борт).

Среднестатистическое значение интенсивности трещиноватости равно  $8 \pm 2.0$  трещин на 1 погонный метр. В 70% объёма горного массива интенсивность трещиноватости составляет выше средней. Массив горных пород рудного тела Глубокое можно классифицировать категориями среднеустойчивый и неустойчивый (70%).

Для дальнейших геомеханических расчетов, средние физико-механические характеристики массива горных пород рудного тела Глубокое сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Средние физико-механические характеристики горных пород и руд, принятые для расчетов первоначальных и техногенных напряжений массива горных пород рудного тела Глубокое

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.90.2>

Физико-механические свойства	Единицы измерения	Значение	
		Для руды	Для вмещающих пород
Коэффициент Пуассона	-	0.29	0.3
Начальный угол внутреннего трения	градус	28	33
Сцепление	МПа	20.3	28
Модуль упругости	ГПа	72	49
Остаточная прочность	МПа	9.7	
Коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протоdjяконова	-	11	7-11
Плотность	т/м <sup>3</sup>	2,75	
Объемный вес	мН/м <sup>3</sup>	0.0275	
Категория устойчивости	-	средней устойчивости, неустойчивые	
Модуль деформации в образце	ГПа	43.3	
Модуль деформации в массиве	ГПа	5-12	

Количество трещин на 1 м	штук	14	
Средний размер структурного блока	м	0.07	
Предел прочности на сжатие в образце, МПа	МПа	70	70
Предел прочности на растяжение в образце, МПа	МПа	11	11

Значения характеристик приняты по усредненным данным лабораторных испытаний образцов керна, отобранного из района рудных интервалов разведочных скважин, пробуренных по рудному телу Глубокое.

Для исследования первоначальных напряжений было заложено две станции щелевой разгрузки на глубине +1000 м. Суммарное количество щелей по обеим станциям равно 24. Количество единичных определений напряжений, в соответствии с методикой, достигло 64. Это обеспечило погрешность определения напряжений массива горных пород в 12%. По результатам натурных измерений установлены следующие значения природных напряжений, действующих в массиве рудного тела на глубине +1000 м: напряжения, действующие в крест простирания рудного тела  $-53.4 \pm 6.6$  МПа, по простиранию  $-29.3 \pm 2.1$  МПа. Вертикальные напряжения составляют в среднем минус  $-27.5 \pm 3.0$  МПа.

Распределение напряжений в массиве горных пород рудного тела Глубокое носит отчетливо выраженный гравитационно-тектонический характер. Тектонические компоненты горизонтальных напряжений равны  $-17.5 - 41.6$  МПа, что составляет 60-78% от значения самих напряжений. Формулы, аппроксимирующие первоначальные напряжения в массиве горных пород рудного тела Глубокое +1000 м, имеют вид:

$$\sigma_B = -\gamma H \quad (1)$$

$$\sigma_{np} = -1.1 \cdot \gamma H = -\frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma H - 17,5 \quad (2)$$

$$\sigma_n = -1.9 \cdot \gamma H = -\frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma H - 41,6 \quad (3)$$

где:  $\gamma$  – объемный вес пород МН/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$H$  – глубина измерения, м;

$\sigma_B$  – вертикальные напряжения, МПа

$\sigma_{np}$  – продольные напряжения МПа;

$\sigma_n$  – поперечные напряжения МПа.

В результате инженерных расчетов и моделирования установлены закономерности распределения техногенных напряжений в кровле, углах кровли и стенках штреков рудного тела Глубокое при разных расстояниях между очистной камерой и откаточным штреком (см. рисунок 2).

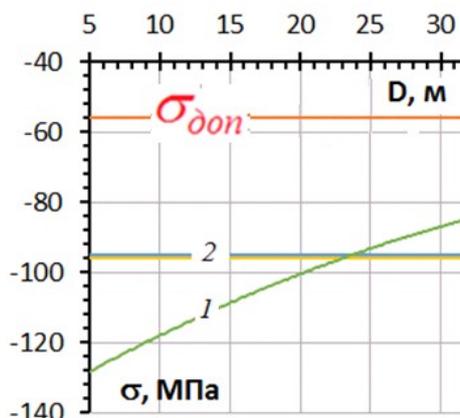


Рисунок 2 - Зависимости полных напряжений  $\sigma$  на контуре полевых штреков от расстояния  $D$  от очистной камеры  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.90.3>

Примечание: 1 – при открытой очистной камере; 2 – при заложённой сухой закладкой очистной камеры;  $\sigma_{доп}$  – линия напряжений, допустимых по проявлениям горного давления в динамических формах, во вмещающих породах

Зависимости были построены для условий: выемочная мощность – 3.0 м, система разработки с открытым очистным пространством с последующей породной закладкой. Зона опорного давления очистной камеры оказывает существенное влияние на расстояние штрека от очистной камеры до  $D = 25$  м. При  $D = 25$  м напряжения в кровле и углах кровли становятся равными напряжениям в одиночных горных выработках. Самыми неустойчивыми участками полевых штреков, как и одиночных выработок являются углы кровли. В них действуют большие сжимающие напряжения, более 100 МПа, что значительно превышает допустимые во вмещающих породах, равные 56 МПа.

Проведенное визуальное обследование горных выработок рудного тела Глубокое показало, что устойчивого состояния пород горных выработок не наблюдается. Породы рудовмещающей зоны в пройденных выработках не устойчивы в пределах самой зоны и на удалении до 10-15 м от ее границы. В остальных интервалах средней устойчивости, за исключением отдельных участков, сложенных слабыми породами и с высокой трещиноватостью. Все выработки требуют крепления. Рудное тело можно охарактеризовать как неустойчивое, склонное к самообрушению на контакте с измененными гранодиоритами (висячий борт). Выработки, пройденные в крест простирания, более устойчивы, чем штрека. Визуальное наблюдение за геомеханическим состоянием массива горных пород подтверждает его поведение в соответствии с проведенными исследованиями. В горных выработках присутствует статическое горное давление, проявляющееся в виде отслоения пород, как по естественной трещиноватости, так и происходит процесс закалывания массива. Признаков динамического проявления горного давления не обнаружено.

### Заключение

Массив горных пород в целом можно характеризовать по степени устойчивости, как средней устойчивости (30%) и неустойчивый (70%). Соответственно все горные выработки требуют крепления, а в тектонически ослабленных зонах и обводненных породах необходимо предусматривать усиленное крепление, не допускающее его отставания при обнажении.

При определении физико-механических свойств горных пород установлено, что породы характеризуются высокими упругими и прочностными свойствами, но с учетом трещиноватости и природной водонасыщенности массива горных пород, опасности в отношении проявления динамического давления не представляют.

В результате проведенных исследований геомеханического состояния массива горных пород рудного тела Глубокое можно сделать вывод, что в массиве действуют главные гравитационно-тектонические напряжения поперечно-горизонтального направления, превышающие вертикальные в 1,9 раза.

Полные напряжения по контуру выработок по характеру проявления являются сжимающими. Выработки, пройденные в крест простирания рудного тела, в меньшей степени будут подвергаться воздействию техногенных напряжений, чем выработки, пройденные по простиранию рудного тела в следствии воздействия первоначальных природных напряжений. В массиве горных пород, на расстоянии до 25 м от очистной камеры, формируется зона повышенного давления, что приводит к проявлению интенсивной трещиноватости пород вскрывающих выработок. Также необходимо учитывать, что в оставляемых целиках также будет происходить процесс интенсивного заколообразования.

Следуя выводам проведенных исследований, можно рекомендовать расположение вскрывающих съездов на расстояние, не ближе 30 м, в породах лежачего бока. Подходы к рудному телу осуществлять квершлагами. Отставание сухой закладки выемочного пространства во время добычи руды из яруса блока должно кратковременно не превышать 20 м. Все пустоты после выдачи руды должны быть заполнены пустой породой. Временно оставляемые целики должны быть не менее 10-15 м по простиранию. Выбор крепления выработок осуществлять исходя горно-геологических условий, проявления горного давления и времени стояния.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Гордиенко И.В. Окинский рудный район Восточного Саяна: геологическое строение. Типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования и перспективы освоения / И.В. Гордиенко, П.А. Рошкеттаев, Д.В. Гороховский // Известия Сибирского отделения. Секции Наук о Земле РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. — 2014. — Вып. — № 6 (49). — С.14-31.
2. Walter Wittke. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model / Wittke Walter. — (AJRM). Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2014. — 865 p.
3. Сосновская Е.Л. Прогноз устойчивости массива горных пород на основе анализа kernового материала разведочных скважин / Е.Л. Сосновская, А.Н. Авдеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — № 3-1. — С. 216-223.
4. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. — М.: Недра, 1994. — 208 с.
5. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. — Екатеринбург: УрО РАН, 2001. — 335 с.
6. Сосновский Л.И. Определение параметров устойчивых целиков и кровли камер при разработке крутопадающих рудных жил на больших глубинах / Л.И. Сосновский // Вестник ИрГТУ. — 2007. — Т.2. — №1. — С. 63-66.

7. Сосновская Е.Л. Управление геомеханическими процессами на золото-рудных жильных месторождениях Восточной Сибири / Е.Л. Сосновская, А.Н. Авдеев // Известия вузов. Горный журнал. — 2019. — № 5. — С. 21—29. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-21-29.
8. Павлов А.М. Прогноз геомеханического состояния массива горных пород глубоких горизонтов Зун-Холбинского месторождения / А.М. Павлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — №5. — С 105-114.
9. Сосновская Е.Л. Прогноз потенциальной удароопасности нижних горизонтов Холбинского рудника / Е.Л. Сосновская, А.Н. Авдеев // Известия вузов. Горный журнал. — 2019. — № 8. — С. 30-37. — DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37.
10. Авдеев А.Н. Обоснование безопасных и эффективных систем разработки маломощных крутопадающих рудных тел на глубинах свыше 1000 м / А.Н. Авдеев, Е.Л. Сосновская, А.М. Павлов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2022. — Вып. 2. — С. 169-180. — DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Gordienko I.V. Okinskij rudnyj rajon Vostochnogo Sajana: geolo-gicheskoe stroenie. Tipy rudnyh mestorozhdenij, geodinamicheskie uslovija ih obrazovaniya i perspektivy osvoenija [Okinsky Ore District of Eastern Sayan: Geological Structure. Types of Ore Deposits, Geodynamic Conditions of Their Formation and Prospects of Development] / I.V. Gordienko, P.A. Roshhektev, D.V. Gorohovskij // Izvestija Sibirskogo otdelenija. Sekcii Nauk o Zemle RAEN. Geologija, poiski i razvedka rudnyh mestorozhdenij [News of the Siberian Branch. The Earth Sciences Section of the Russian Academy of Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits]. — 2014. — № 6 (49). — P. 14-31. [in Russian].
2. Walter Wittke. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model / Wittke Walter. — (AJRM). Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2014. — 865 p.
3. Sosnovskaja E.L. Prognoz ustojchivosti massiva gornyh porod na osnove analiza kernovogo materiala razvedochnyh skvazhin [Forecast of the Stability of the Array of Gold Ore Deposits Based on the Analysis of Core Material from Exploration Core Drilling Wells] / E.L. Sosnovskaja, A.N. Avdeev // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. — 2020. — № 3-1. — P. 216-223. — DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223. [in Russian].
4. Vloh N.P. Upravlenie gornym davleniem na podzemnyh rudnikah [Management of Rock Pressure at Underground Mines] / N.P. Vlokh. — M.: Nedra, 1994. — 208 p. [in Russian].
5. Zubkov A.V. Geomehanika i geotehnologija [Geomechanics and Geotechnology]. — Yekaterinburg: UrB RAS, 2001. — 335 p. [in Russian].
6. Sosnovskij L.I. Opredelenie parametrov ustojchivyh celikov i krovli kamer pri razrabotke krutopadajushhijh rudnyh zhil na bol'shijh glubinah [Determination of the Parameters of Stable Pillars and the Roof of Chambers during the Development of Steep-falling Gold Veins at Great Depths] / L.I. Sosnovskij // Vestnik IrGTU [Bulletin of IrSTU]. — 2007. — V.2. — №1. — P. 63-66. [in Russian].
7. Sosnovskaja E.L. Upravlenie geomehanicheskimi processami na zoloto-rudnyh zhil'nyh mestorozhdenijah Vostochnoj Sibiri [Control over the Geotechnical Processes at the Goldfields of Eastern Siberia] / E.L. Sosnovskaja, A.N. Avdeev // Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal [News of Universities. Mining Magazine]. — 2019. — № 5. — P. 21—29. — DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-21-29. [in Russian].
8. Pavlov A.M. Prognoz geomehanicheskogo sostojaniya massiva gornyh porod glubokih gorizontov Zun-Holbinskogo mestorozhdenija [Forecast of the Geomechanical State of the Deep Horizon Rock Mass of the Zun-Kholbinsk Deposit] / A.M. Pavlov // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. — 2020 — №5. — P. 105-114. [in Russian].
9. Avdeev A.N. Obosnovanie bezopasnyh i jeffektivnyh sistem razrabotki malomoshnyh krutopadajushhijh rudnyh tel na glubinah svyshe 1000 m [Validation of Safe and Efficient Mining Geotechnologies for Low Thickness Steeply Declining Ore Bodies at Depths above 1000 m] / A.N. Avdeev, E.L. Sosnovskaja, A.M. Pavlov // Izvestija TulGU. Nauki o Zemle [News of TulSU. Earth Sciences]. — 2022. — Issue. 2. — P. 169-180. [in Russian].
10. Sosnovskaja E.L. Prognoz potencial'noj udaroopasnosti nizhnijh gorizontov Holbinskogo rudnika [Forecasting Potential Rockburst Hazard of Kholbinsky Mine Lower Horizons] / E.L. Sosnovskaja, A.N. Avdeev // Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal [TulSU News. Earth Sciences]. — 2019. — № 8. — P. 30-37. — DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37. [in Russian].