

УДК 553.435+551.243.6

DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011

Оригинальная статья

## Объемная цифровая модель тектонической структуры глубоких горизонтов Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ)

Г.С. Январёв , Б.Б. Бобмуротов 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,  
e-mail: egor\_yan@list.ru

Статья поступила: 28.05.2024, доработана: 18.06.2024, принята к публикации: 19.06.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Объемное цифровое моделирование тел полезных ископаемых в процессе добычи и эксплуатационной разведки все более активно внедряется в практику работ горнодобывающих предприятий, в том числе для построения моделей тектонических структур и анализа воздействия тектоники на рудные тела. В настоящей работе раскрыта методика анализа тектонической структуры глубоких горизонтов западного фланга Главной рудной залежи Урупского месторождения, приведены результаты построения объемных моделей разрывных нарушений, на основе которых возможно получение новой информации и выявление скрытых, ранее не фиксированных закономерностей. **Цель работы.** Построение объемной модели и анализ внутренней структуры Урупского разлома, разбивающего главную рудную залежь на тектонические блоки. Комплексирование инструментария горно-геологической информационной системы «Micromine» для построения объемной модели тектонической зоны. Анализ воздействия разрывных нарушений на рудную залежь. **Методика исследования.** Для построения модели построены матричная модель кровли рудной залежи, стереограмма ориентировки трещинных структур, проведен ее кластерный анализ. Прослежены наиболее крупные и значимые смещения по основным направлениям трещиноватости. Построены каркасы рудного тела, ограниченные трещинами. **Результаты исследования.** Построены каркасные модели основных разрывных структур месторождения, каркасные модели тектонических блоков Главной рудной залежи. Сделан вывод о сложнопостроенной трехмерной геометрии Урупского разлома, состоящего из периодических серий трещин разного порядка, кулисообразно расположенных как по отношению к генеральной линии простирания разлома, так и по отношению друг к другу. Установлен левосдвиговый характер Урупского разлома. Внутренняя структура разлома обусловлена периодической серией малоамплитудных сбросов косо ориентированных к генеральному направлению сдвига. Амплитуда смещения рудных блоков вдоль разломов компенсируется серией взбросов. Блоки образуют мозаику притертых рудных тел, смещенных относительно друг друга в разных направлениях.

**Ключевые слова:** Урупское месторождение, ГГИС «Micromine», тектоническая структура, сдвиг, цифровая модель.

**Для цитирования:** Январёв Г.С., Бобмуротов Б.Б. Объемная цифровая модель тектонической структуры глубоких горизонтов Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 143-153. DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011

DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011

Original paper

# A volumetric digital model of the tectonic structure of the deep horizons of the Urup copper-pyrite deposit (North Caucasus)

G.S. Yanvarev<sup>ID</sup>, B.B. Bobomurotov<sup>ID</sup>

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk 346428, Russian Federation,  
e-mail: egor\_yan@list.ru

Received: 28.05.2024, revised: 18.06.2024, accepted: 19.06.2024

**Abstract: Relevance.** Volumetric digital modeling of mineral bodies in the process of mining and operational exploration is increasingly being introduced into the practice of mining enterprises, including for building models of tectonic structures and analyzing the impact of tectonics on ore bodies. In this paper, the methodology for analyzing the tectonic structure of the deep horizons of the western flank of the Main ore deposit of the Urup deposit is disclosed, the results of constructing volumetric models of discontinuous faults are presented, on the basis of which it is possible to obtain new information and identify hidden, previously not fixed patterns. **Aim.** Construction of a volumetric model and analysis of the internal structure of the Urup fault, which divides the main ore deposit into tectonic blocks. Integration of the tools of the mining and geological information system "Micromine" to build a volumetric model of the tectonic zone. Analysis of the impact of discontinuous faults on the ore deposit. **Methods.** To construct the model, a matrix model of the roof of an ore deposit orientation stereograms of fractured structures were constructed, and their cluster analysis was carried out. The largest and most significant displacements in the main directions of fracturing have been traced. The skeletons of the ore body, bounded by cracks, were built. **Results.** Frame models of the main discontinuous structures of the deposit and frame models of tectonic blocks for the Main ore deposit were constructed. The conclusion is made about the complexly constructed three-dimensional geometrization of the Urup fault, consisting of periodic series of cracks of different orders, arranged in a backstage manner both in relation to the general fault line and in relation to each other. The left-thrust character of the Urup fault has been established. The internal structure of the fault is caused by a periodic series of low-amplitude slip faults obliquely oriented towards the general direction of shear. The amplitude of the displacement of ore blocks along the faults is compensated by a series of upthrusts. The blocks form a mosaic of ground ore bodies displaced relative to each other in different directions.

**Keywords:** Urup field, GIS "Micromine", tectonic structure, shift, digital model.

**For citation:** Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. A volumetric digital model of the tectonic structure of the deep horizons of the Urup copper-pyrite deposit (North Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(2): 143-153. DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011

## Введение

Урупское медноколчеданное месторождение расположено в Лабино-Урупском горнопромышленном центре и является основным эксплуатируемым объектом меди Северного Кавказа [Богущ и др., 2021]. В геологических разрезах Урупского рудного поля выделяются три структурных этажа: юрский, пермский и девонский. В пределах рудного поля известно три медноколчеданных месторождения (Урупское, Власенчихинское, Скалистое) и несколько рудопроявлений. Все месторождения и рудопроявления пространственно и генетически связаны с девонскими от-

ложениями. Власенчихинское месторождение полностью отработано, Урупское и Скалистое – разрабатываются в настоящее время. На Урупском месторождении рудовмещающий девонский осадочно-вулканогенный комплекс приурочен к южному крылу сводового поднятия, вытянутого в субширотном направлении. В структурном плане месторождение представляет собой моноклираль, осложненную разрывными нарушениями разных направлений (рис. 1).

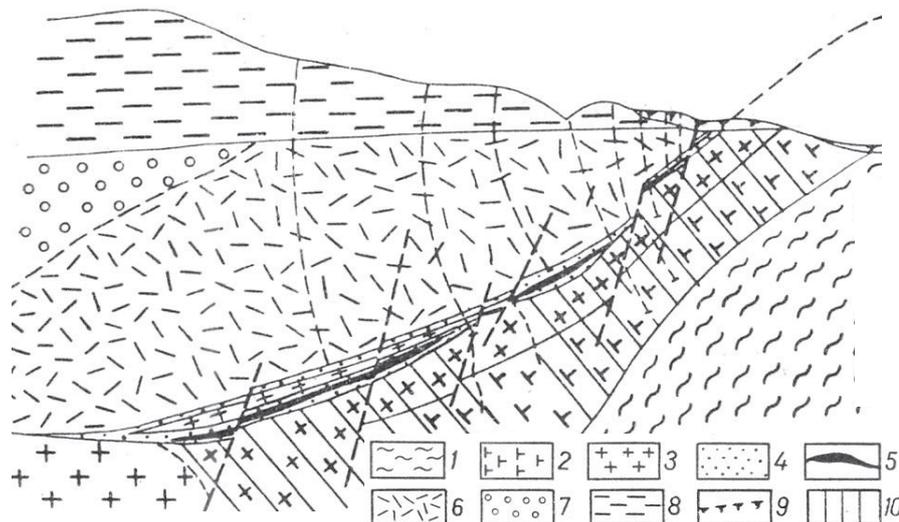


Рис. 1. Структурный разрез Урупского месторождения (по Н.С.Скрипченко [1972]).  
1 – филлиты/ phyllites; 2 – диабазовые порфириты/diabase porphyrites; 3 – кварцевые альбитофиры/ quartz albitophyres; 4 – туфогенно-осадочная толща/tuff-sedimentary strata;  
5 – колчеданная руда/ pyrite ore; 6 – туфы/tuffs; 7 – пермские конгломераты//

Fig. 1. The structural section of the Urupskoye field. By N.S.Skripchenko [1972].  
Permian conglomerates; 8 – юрские отложения/ Jurassic deposits; 9 – делювий/deluvium;  
10 – гидротермально-измененные породы/hydrothermally modified rocks

Большинство аналитических работ, опубликованных по месторождению, базируется на информации, полученной при разведке и эксплуатации верхних горизонтов (от I до X) [Скрипченко, 1966; Савченко и др., 1973; Hutchinson, 1973; Смирнов, 1978; Твалчрелидзе и др., 1979; Рябов, 1983; Skripchenko et al., 1986]. В настоящее время накоплен большой объем информации, полученной при эксплуатации глубоких горизонтов (XII–XVI), который требует дополнительного анализа с использованием современного инструментария цифрового объемного моделирования.

Ранее впервые для глубоких горизонтов Урупского медноколчеданного месторождения была построена объемная цифровая модель Главной рудной залежи, иллюстрирующая пространственное распределение содержаний и запасов рудных компонентов, раскрыта последовательность выполнения операций по построению блочной модели [Январёв, Бобомуротов, 2023].

В настоящей работе продолжено изучение глубоких горизонтов, впервые создана объемная модель основной тектонической структуры западного фланга месторождения – Урупского разлома, где эта структура рассматривается как сложно-построенное геологическое тело сдвигового характера.

## Методы работы

Цифровое моделирование месторождений полезных ископаемых все более активно используется горнодобывающими предприятиями, в том числе для постро-

ения моделей тектонических структур и анализа воздействия тектоники на рудные тела [Sides, 1997; Mao et al., 2020; Liu et al., 2022].

Главная залежь Урупского месторождения обобщенно представляет собой линзу массивных колчеданных руд, субсогласных прожилков и рассеянной вкрапленности сульфидов на контакте эффузивных и туфогенно-осадочных пород, падающую на юг под углом 22–25°. В связи с широким развитием пострудных разрывных нарушений рудная залежь разбита на отдельные тектонические блоки различных размеров (от долей метров до десятков метров), смещённых относительно друг друга.

Разрывные нарушения, проявленные на верхних горизонтах (III–VI), и их роль в формировании структуры месторождения ранее изучалась сотрудниками кафедры месторождений и разведки полезных ископаемых Новочеркасского политехнического института (НПИ) [Савченко и др., 1973]. Для верхних горизонтов установлено преобладание разрывов северо-западного простирания. Наиболее распространены сбросы и надвиги. Доминирует система продольных разрывов с простиранием 300° и падением на юго-запад под углом 50–70°. К этой системе относятся самые крупные нарушения месторождения – Урупский и Центральный разломы с амплитудой смещения 70–120 м, показанные на совмещенном плане горизонтов. План дополнен авторами конфигурацией рудного тела на XII–XVIII горизонтах. Также авторами обозначены Диагональный и Западный сбросы, ориентированные под углом 30° к простиранию основных разломов со смещением более 30 м (рис. 2).

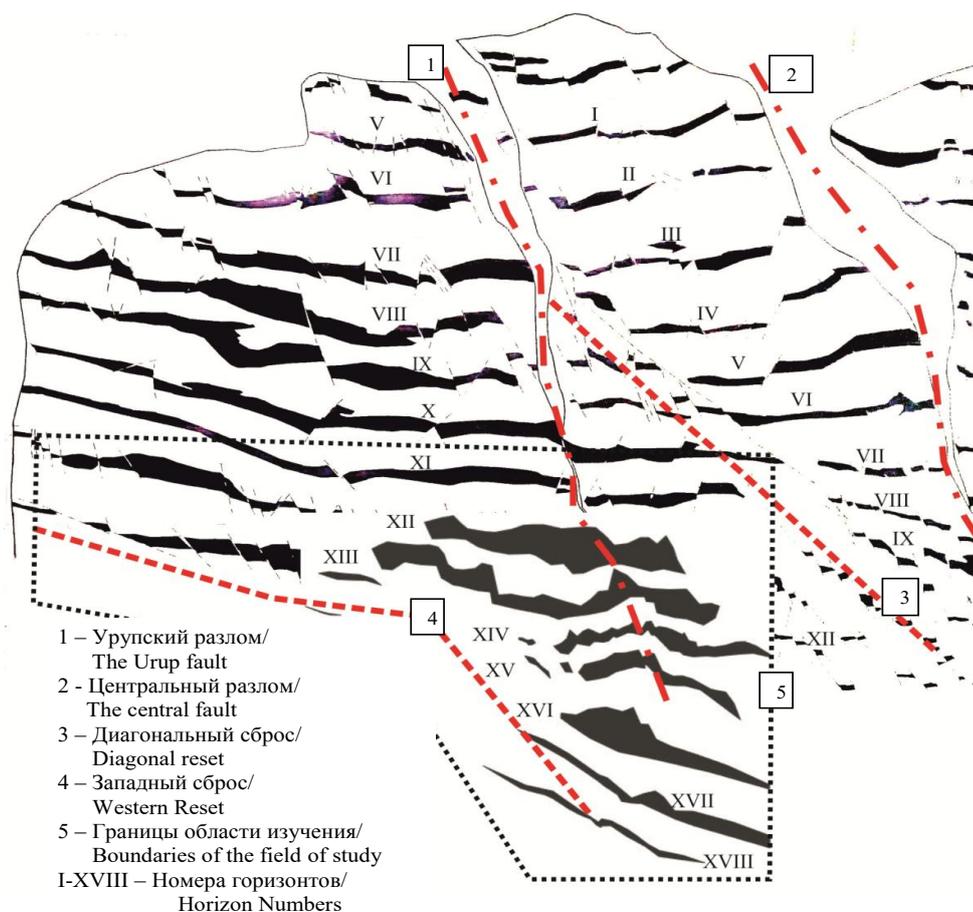


Рис. 2. Совмещенный план 0–XVIII горизонтов Главной рудной залежи (по В.Л. и О.В. Андреевым с дополнениями авторов)/

Fig. 2. Combined plan 0–XVIII horizons of the Main ore deposit (by V.L. and O.V. Andreev with additions by the authors)

Тектоническая нарушенность глубоких горизонтов ранее детально не изучалась и не анализировалась. Авторами продолжено изучение разрывных нарушений на глубоких горизонтах западного фланга месторождения. Исходными данными для выполнения работы являются материалы Урупского ГОКа, представленные разрезами эксплуатационной разведки м-ба 1:200. На каждом из разрезов от 4 до 37, охватывающих широкую зону проявления Урупского разлома, снимались трехмерные координаты точек нарушений, зафиксированных в горных выработках с определением азимутов и углов падения. Таким образом, была создана база для анализа разрывных нарушений, состоящая из 300 замеров координат и элементов залегания трещин. Также сняты трехмерные координаты кровли Главной залежи, зафиксированные 520 скважинами эксплуатационной разведки в разрезах от 8 до 99.

На рис. 3 показаны цифровая матричная модель (грид) кровли рудного тела в области изучения в свето-теневом представлении и стереограмма замеров элементов залегания трещин. На гриде отчетливо видно, что участки погружений и поднятий кровли образуют периодическую серию коротких валов, уверенно трассирующих простирание Урупского разлома, но ориентированных под углом к генеральной линии простирания.

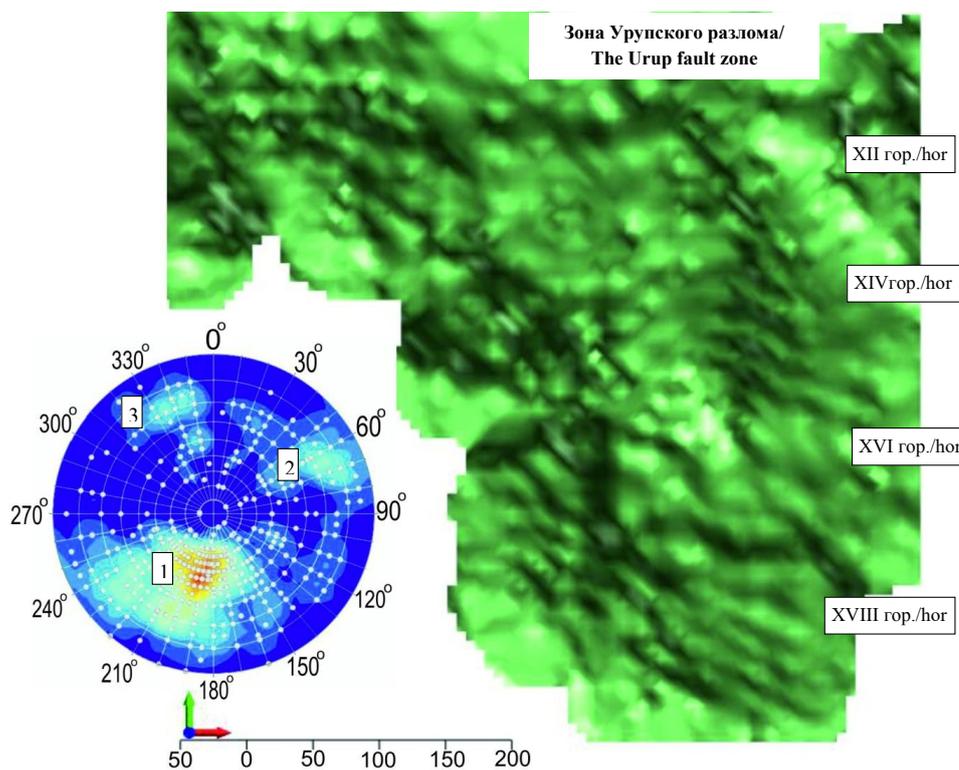


Рис. 3. Матричная модель отметок кровли Главного рудного тела на глубоких горизонтах в границах области изучения (пояснения в тексте)/

Fig. 3. Matrix model of the roof marks of the Main ore body at deep horizons within the boundaries of the field of study (explanations in the text)

По базе разрывных нарушений построена стереограмма (полярная сетка, верхнее полушарие, равноплощадная проекция), на которой отчетливо видны три доминирующих кластера нарушений, выделенных на основе их плотности распределения. Средние параметры элементов залегания кластеров трещин приведены в табл. 1.

Таблица 1/ Table 1

**Усредненная характеристика разрывных нарушений в области Урупского разлома/  
The average characteristic of discontinuous faults in the Urup fault area**

Номер кластера/ Cluster number	Азимут падения/ Azimuth of the fall	Азимут простирания/ Azimuth of the strike	Угол падения/ Angle of incidence	Количество замеров/ Number of measurements
1	199°	289°	42°	440
2	64°	331°	28°	38
3	337°	67°	21°	40

Трещины первого кластера в разрезах фиксируются как многочисленные сбросы с опущенным юго-западным крылом. Амплитуда смещения не превышает первых метров и быстро затухает в породах подошвы и кровли рудного тела. Второй кластер трещин гораздо менее многочисленен, но в разрезах проявлен отчетливо в виде взбросов. Амплитуда смещения достигает 20 метров. Трещины третьего кластера падают на северо-запад, имеют минимальную амплитуду смещения и в разрезах на форме рудных тел практически не отражаются.

Количество трещин первого кластера в области Урупского разлома, выявленных в горных выработках, составляет от 3 до 10 на каждые 100 метров протяженности рудного тела. Для геометризации и объемного моделирования конкретных разломов были выбраны пять уверенно увязанных нарушений, фиксированных трещинами первого кластера. При увязке линий разломов в разрезах использовались геологическая документация буровых скважин и горных выработок, закономерности зонального распределения содержаний рудных компонентов, выявленные ранее [Бобомуротов, 2022; Бобомуротов, Январев, 2023]. Важно отметить, что каждый из разломов представляет собой пространственно сближенную периодическую серию разрывов, обобщенных в единую плоскость. Для этих плоскостей с использованием инструментария ГГИС Micromine были построены каркасы. Аналогичным образом построены каркасы для трех разломов по трещинам второго кластера и каркас западного сброса (рис. 4).

При рассмотрении общей картины пространственного расположения разрывов разного порядка выявляются вложенные структуры с одинаковой конфигурацией: разломы второго порядка (Диагональный и Западный сбросы) ориентированы под углом к разломам первого порядка (Урупскому и Центральному); разломы третьего порядка (трещины первого кластера) ориентированы под таким же углом к условной линии Урупского разлома; нарушения четвертого порядка (валы дешифрирования матричной модели кровли залежи) также косо ориентированы к выделенным разломам в разрезах.

Трещины второго кластера трассируют разрывные нарушения субширотного простирания. Всего нами уверенно были увязаны три разлома, по которым южные крылья подняты по отношению к северным на 15-20 метров (см. рис. 4). Для поверхностей разломов характерна винтообразная форма, когда восточная часть плоскости смещения имеет падение на северо-восток, а западная – на юго-запад. То есть эти трещины фиксируют поверхности срыва и скручивания, возникающие при сжатии [Уилсон, 1985].

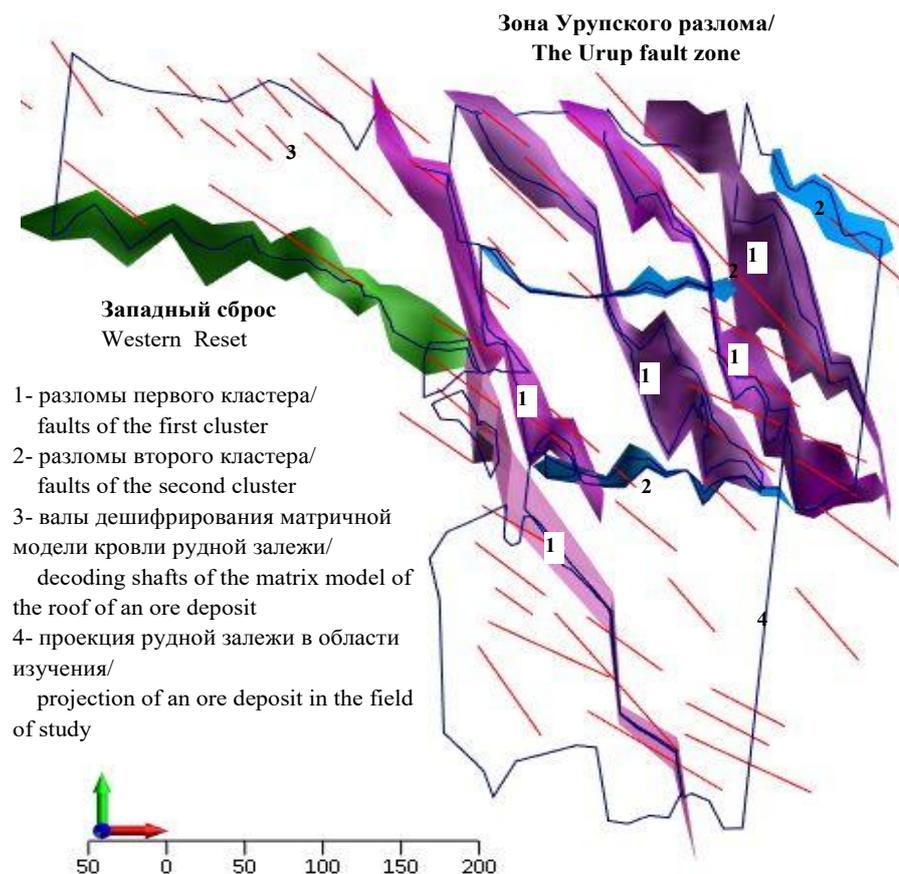


Рис. 4. Пространственные модели разрывных нарушений на глубоких горизонтах западного фланга Урупского месторождения /

Fig. 4. Spatial models of discontinuous faults in the deep horizons of the western flank of the Urupskoye field

Каждая часть Главной залежи, заключенная между разломами, представляет собой деформируемое тело, находящееся в сплошной бесконечной среде [Эз, 1985]. В сплошной среде относительное перемещение всякого малого объема является результатом деформации включающего его большего объема. Исходя из этого, логично предположить, что поднятия южного крыла трещин второго кластера компенсируют смещение тектонических блоков на юго-запад по трещинам первого кластера.

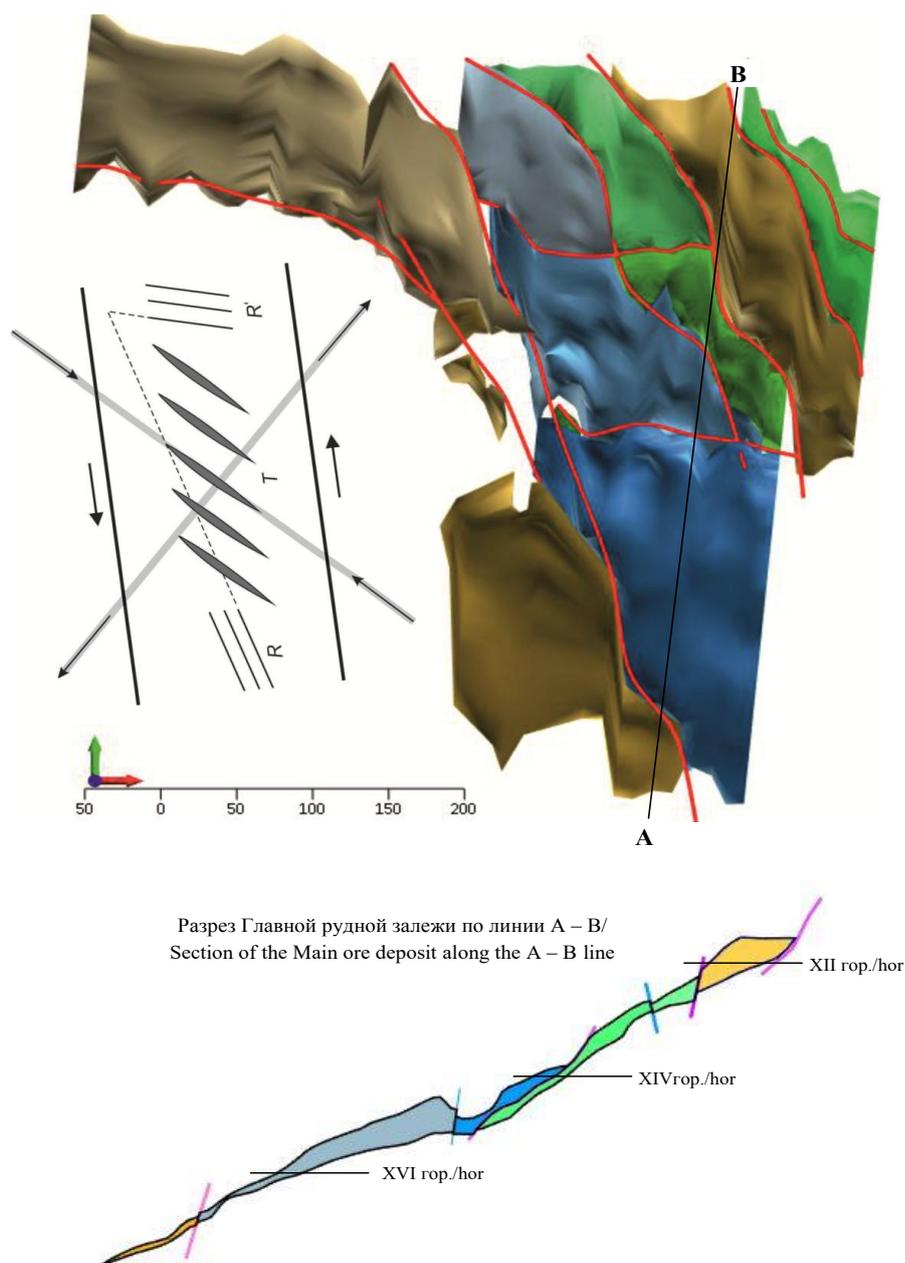
В целом Урупский разлом можно рассматривать как систему левого сдвига, что подчеркивается правокулисным расположением периодической серии разрывов, соответствующих сколам Риделя. При этом трещины второго кластера соответствуют сопряженным сколам с противоположным смещением, а деформации кровли залежи – структурам растяжения.

### Результаты работы и их обсуждение

Рудная залежь разбита на многочисленные тектонические блоки разных размеров разрывными нарушениями сбросового и надвигового типа (рис. 5).

Поверхности каркасов первого кластера ориентированы по азимуту 330 градусов и падают на юго-запад под углом 55-70°. В связи с направлением разведочных линий на месторождении под острым углом к простиранию разломов, на разрезах они выглядят как более пологие структуры. Характерно, что центральные части по-

верхностей разломов имеют более крутое падение, чем краевые. Вследствие этого трещины приобретают S-образную форму, что весьма характерно для трещин растяжения [Shainin, 1950]. Размеры разломов по простиранию достигают 370 метров, по падению – не превышают 80 метров. Все пять разломов ориентированы одинаково, имеют кулисообразное расположение с шагом 40-60 метров. По отношению к генеральной линии Урупского разлома, выделенные нарушения ориентированы под углом 25-30°. Амплитуда смещения по разломам, измеренная по кровле рудной залежи составляет от 3 до 12 метров. По геологической документации разломы представляют собой плотно притертые зоны милонитизации, вырождающиеся в породах подошвы рудного тела в зоны рассланцевания.



*Рис. 5. Тектонические блоки Главной рудной залежи на глубоких горизонтах западного фланга Урупского месторождения /*  
*Fig. 5. Tectonic blocks of the Main ore deposit in the deep horizons of the western flank of the Urupskoye deposit*

Западный разлом ориентирован по азимуту 290° и падает на юг под углом 55-60°. Его простираие максимально близко к простираию структур растяжения, проявленных в кровле рудной залежи (см. рис. 2,3). На разрезах разлом проявлен в виде нескольких часто ветвящихся трещин. Южное крыло разлома опущено по отношению к северному. Суммарная амплитуда смещения составляет не менее 40-50 м. Морфологически разлом является типичным сбросом. Выявление внутренней структуры разлома осложнено тем, что он расположен в области естественного выклинивания Главной залежи.

### Выводы

В результате статистического пространственного анализа и объемного моделирования с использованием инструментария ГГИС «Micromine» проанализировано внутреннее строение зоны Урупского разлома на глубоких горизонтах месторождения. Установлено, что Урупский разлом представляет собой сложно построенное трехмерное тело, состоящее из периодических серий тектонических трещин разного порядка, кулисообразно расположенных как по отношению к генеральной линии простираия разлома, так и по отношению друг к другу. Объемное тело разлома состоит из сочетания сбросов и компенсирующих их надвигов. Геодинамически Урупский разлом представляет собой левый сдвиг с косым смещением по простираию и падению по отношению к плановой поверхности.

Наиболее крупными ветвями разлома Главная рудная залежь разбита на тектонические блоки. Блоки образуют мозаику притертых рудных тел, смещенных относительно друг друга в разных направлениях.

### Литература

1. Богущ И.А., Рябов Г.В., Бурцев А.А. Колчеданы Северного Кавказа. Перспективы рудоносности Худесского месторождения. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 6–16. DOI:10.46698/VNC.2021.80.87.001.
2. Бобомуротов Б.Б. Пространственное распределение меди и цинка в Главной рудной залежи Урупского медноколчеданного месторождения, Северный Кавказ. // Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений. Научное издание. – Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, – 2022. 248 с.
3. Бобомуротов Б.Б., Январев Г.С. Структурно-фациальные особенности рудных тел на глубоких горизонтах западного фланга Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ). // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XIII. – М: ИИЕТ РАН, – 2023. С. 58–63.
4. Рябов Г.В. Зональность Урупского колчеданного месторождения. // Геология рудных месторождений. – 1983. – № 5. – С. 102–108.
5. Савченко Н.А., Скрипченко Н.С., Тамбиев А.С. Урупский рудный район. / В кн. Колчеданные месторождения Большого Кавказа. М.: Недра, – 1973. – С. 75–100.
6. Скрипченко Н.С. Вулканогенно-осадочное рудообразование (на примере колчеданных месторождений Северного Кавказа). М.: Недра, – 1966. 291 с.
7. Скрипченко Н.С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. М.: Недра, – 1972. 214 с.
8. Смирнов В.И. Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Изд. 2-е, перераб. и доп. Т. 2. – М.: Недра, – 1978. 399 с.
9. Твалчрелидзе А.Г., Ярошевич В.З., Нарозаули Н.Г. Генетическая модель Урупского медноколчеданного месторождения. // Геология рудных месторождений. – 1979. – № 6. – С. 44–58.

10. Уилсон Дж. Геологические структуры малых форм. Пер. с англ. М.: Недра, 1985. – 112 с.
11. Эз В.В. Складкообразование в земной коре. М.: Недра, – 1985. 240 с.
12. Январёв Г.С., Бобомуротов Б.Б. Объемная цифровая модель глубоких горизонтов Главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 113. № 1. – С. 125–135. DOI:10.46698/VNS.2023.90.90.009.
13. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia Q. Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. // *Natural Resources Research*. – 2022. – Vol. 31. – pp. 1825–1840. DOI: 10.1007/s11053-022-10075-2.
14. Mao X., Zhang W., Liu Z., Ren J., Bayless R.C., Deng H. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China. // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. Issue 3. – pp. 1–21.
15. Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. // *Economic Geology*. – 1973. – Vol. 68. – pp. 1223–1246.
16. Sides E. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. // *Geologische Rundschau*. – 1997. – Vol. 86. – pp. 342–353. DOI: 10.1007/s005310050145.
17. Shainin V.E. Conjugate sets of en echelon tension fractures in the Athens Limestone at Riverton, Virginia. // *Bulletin of the Geological Society of America*. – 1950. – Vol. 61. – pp. 509–517.
18. Skripchenko N.S., Shcheglov V.I., Ryabov G.V., Andreev V.L. Zonung of massive sulfide deposits and their origin. // *Geology and metallogeny of copper deposits*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 1986. – pp. 350–357.

## References

1. Bogush I.A., Ryabov G.V., Burtsev A.A. Pyritic deposits of North Caucasus. Prospects of minerality of Hudes deposit. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 6–16. DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001. (in Russ.)
2. Bobomurotov B.B. Spatial distribution of copper and zinc in the main ore deposit of the Urup copper-crusted deposit, North Caucasus. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2022. From material composition to models and forecasting of deposits*. Scientific publication. Miass. YUUFNC MiGUro RAS. 2022. 248 p. (in Russ.)
3. Bobomurotov B.B., Janvarev G.S. Structural and facies features of ore bodies in the deep horizons of the western flank of the Urup copper-pyrite deposit (Severny Kavaz). *Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus*. Vol. XIII. Moscow. IIET RAS. 2023. pp. 58–63. (in Russ.)
4. Ryabov G.V. Zonality of the Urup pyrite deposit. *Geology of ore deposits*. 1983. No. 5. pp. 102–108. (in Russ.)
5. Savchenko N.A., Skripchenko N.S., Tambiev A.S. Urup ore district. In the book. *Pyrite deposits of the Greater Caucasus*. Moscow. Nedra. 1973. pp. 75–100. (in Russ.)
6. Skripchenko N.S. Volcanogenic-sedimentary ore formation (on the example of pyrite deposits of the North Caucasus). Moscow. Nedra. 1966. 291 p. (in Russ.)
7. Skripchenko N.S. Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basaltoid formations. Moscow. Nedra. 1972. 214 p.
8. Smirnov V.I. Ore deposits of the USSR. In 3 vols. 2nd Ed., reprint. and rev. Vol. 2. Moscow. Nedra. 1978. 399 p. (in Russ.)
9. Tvalchrelidze A.G., Yaroshevich V.Z., Narozauli N.G. Genetic model of the Urup copper-crusted deposit. *Geology of ore deposits*. 1979. No. 6. pp. 44–58. (in Russ.)
10. Wilson J. Geological structures of small forms. Translated from English. Moscow. Nedra. 1985. 112 p. (in Russ.)
11. Ez V.V. Folding in the Earth's crust. Moscow. Nedra. 1985. 240 p. (in Russ.)

12. Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urup copper-crusted deposit. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 125–135. DOI: 10.46698/VNS.2023.90.90.009. (in Russ.)
13. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia Q. Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. *Natural Resources Research*. 2022. Vol. 31. pp. 1825–1840. DOI: 10.1007/s11053-022-10075-2.
14. Mao X., Zhang W., Liu Z., Ren J., Bayless R.C., Deng H. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China. *Minerals*. 2020. Vol. 10. Issue 3. pp. 1–21.
15. Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Economic Geology*. 1973. Vol. 68. pp. 1223–1246.
16. Sides E. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. *Geologische Rundschau*. 1997. Vol. 86. pp. 342–353. DOI: 10.1007/s005310050145.
17. Shainin V.E. Conjugate sets of en echelon tension fractures in the Athens Limestone at Riverton, Virginia. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1950. Vol. 61. pp. 509–517.
18. Skripchenko N.S., Shcheglov V.I., Ryabov G.V., Andreev V.L. Zonung of massive sulfide deposits and their origin. *Geology and metallogeny of copper deposits*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1986. pp. 350–357.