

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ КРАСНОТУРЬИНСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

С. Н. Тагильцев, Т. Н. Кибанова

Regularities of the tectonic stress field in the geological environment of the Krasnoturinsky ore district

S. N. Tagil'tsev, T. N. Kibanova

For many years, the deposits of a number of minerals were developed and explored on the territory of the Krasnoturinsky ore district. The Severo-Peschansky iron ore deposit is located 4 km north of the Vorontsovsky gold deposit. All the objects on which the authors conducted the study of the orientation of cracks are at the top part of the geological section. Analysis of the elements of occurrence of fracture systems makes it possible to determine the orientation of the main maximum stresses in this part of the geological section. The authors carried out a large number of measurements of the stress-strain state (SSS) of rock massifs in the mines of the North-Peschansky deposit. These data allows analyzing the relationship between the values of the main stresses, the orientation of the axes of the main stresses, and the position of the measurement points in depth. Analysis of data on ore deposits suggests that the complex use of geological-structural and geomechanical methods for studying the stress-strain state of rock massifs allows reliable determining of the regularities of the SSS. The main directions of the main maximum stress (MMS) have sublatitudinal orientations (260° - 270° and 280° - 290°). In the near-surface part of the geological section, the stress field is transformed, and one can observe different directions of the SSS in different blocks of rocks. Basic SSS during the unloading of tectonic stresses often change their orientation by 90° and acquire a submeridional orientation. The remaining directions of the effect of maximum stresses are fixed in local areas and have an auxiliary type.

Keywords: stress-strain state; rock massifs; geological-structural and geomechanical methods; main directions of maximum stress.

На территории Краснотурьинского рудного района многие годы разрабатывались и разведывались месторождения ряда полезных ископаемых. Северо-Песчанское железорудное месторождение расположено в 4 км севернее Воронцовского золоторудного месторождения. Все объекты, на которых производилось изучение ориентировки трещин, находятся в верхней части геологического разреза. Анализ элементов залегания систем трещин позволяет определить ориентировку главных максимальных напряжений в этой части геологического разреза. В горных выработках Северо-Песчанского месторождения выполнено довольно большое количество измерений напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород. Эти данные позволяют проанализировать взаимосвязь значений главных напряжений, ориентировки осей главных напряжений и положение точек измерений по глубине. Анализ данных по месторождениям рудного района позволяет считать, что комплексное использование геолого-структурных и геомеханических методов изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород позволяет надежно определить закономерности НДС. Основные направления действия главного максимального напряжения (ГМН) имеют субширотные ориентировки (260° - 270° и 280° - 290°). В приповерхностной части геологического разреза происходит трансформация поля напряжений, и в разных блоках горных пород могут наблюдаться различные направления ГМН. Основные ГМН в процессе разгрузки тектонических напряжений нередко меняют свою ориентировку на 90° и приобретают субмеридиальную направленность. Остальные направления действия максимальных напряжений фиксируются на локальных участках и имеют вспомогательный характер.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; скальные массивы; геолого-структурные и геомеханические методы; главные направления максимального напряжения.

На территории Краснотурьинского рудного района многие годы разрабатывались и разведывались месторождения ряда полезных ископаемых. В качестве основных объектов, по которым имеется интересный и разнообразный фактический материал, следует назвать Воронцовское золоторудное и Северо-Песчанское железорудное месторождения. Эти объекты находятся в Краснотурьинском районе Свердловской области на восточном склоне Урала.

Разведка Воронцовского золоторудного месторождения выполнялась в 1980-е и в начале 1990-х гг. В связи со сложными гидрогеологическими и инженерно-геологическими условиями месторождения специальные работы производились в большом объеме, и к их выполнению привлекались опытные и высококвалифицированные исследователи. Методика работ включала использование телефотометрии скважин и специальные способы документации керна скважин.

Северо-Песчанское железорудное месторождение расположено в 4 км севернее Воронцовского золоторудного месторождения. Разработка железных руд ведется многие годы, и сейчас достигла глубин более 500 м от поверхности земли. В связи со сложными горно-геологическими условиями на этом месторождении в течение длительного периода производили исследования специалисты ИГД УрО РАН (г. Екатеринбург). В процессе исследований были получены разнообразные материалы, связанные с напряженно-деформированным состоянием (НДС) массива горных пород.

Район приурочен к вулканоплутоническому поясу силурийско-девонского возраста (S_1 - D_3). Вулканиды представлены андезитами, андезито-базальтами, трахиандезитами, вулканокластическими и вулканогенно-осадочными породами, слагающими Турьинскую структурно-формационную зону. Месторождения расположены в зоне Воронцовского разлома, в западном экзоконтакте Ауэрбаховской интрузии. В дальнейшем Воронцовский разлом многократно подновлялся. В мезозойское время он был трансформирован в надвиг [1, 2].

Рудные тела месторождений локализируются на контакте мраморизованных известняков и вышележащих вулканогенно-осадочных пород. Известняки под углом 20° - 30° погружаются в районе Воронцовского разлома под породы вулканогенной толщи. Одной из самых сложных задач при изучении Воронцовского месторождения являлось исследование закарстованности карбонатных отложений [1, 3]. Для решения этой задачи на стадии детальной разведки были пройдены 23 гидрогеологические скважины глубиной до 300 м. В процессе разведки месторождения детально изучалась трещиноватость известняков. Кроме анализа данных телефотодокументации скважин производилась съемка трещин в карьере флюсовых известняков и в шурфах. Результаты обработки замеров представлены в виде круговых диаграмм [3].

Анализ данных, представленных в отчете [3], производился по методикам, изложенным в [2]. Центры систем трещин выносились на координатную сетку, причем субвертикальные системы трещин пересчитывались в азимуты простирания. Все объекты, на которых производилось изучение ориентировки трещин, находятся в верхней части геологического разреза. В карьере и

Таблица 1. Результаты анализа систем трещин.

Объект измерения трещин	Направления по азимуту оси ГМН, град.				Сдвиговые зоны
	Преобладающее	Хорошо выраженное	Слабо выраженное	Выраженное только в верхнем этаже	
Скважины ИГ-4 и ИГ-5	260–270; 230–240	290–300; 350–360	–	350–360	320–330
Карьер флюсовых известняков	230–240	–	320–330	–	350–360; 210–220; 270–280
Шурфы	260–270	–	320–330; 230–240	320–330; 230–240	180–190
Сводные данные	260–270; 230–240	290–300; 350–360	320–330; 230–240	350–360; 320–330	320–330; 210–220; 180–190

шурфах точки измерения элементов залегания трещин располагались на глубинах, не превышающих первых десятков метров. В скважинах глубина изучения трещиноватости составила 300 м.

На глубинах, вскрытых карьером и шурфами, хорошо проявились только два направления действия главных максимальных напряжений (ГМН). Эти направления ориентированы по азимутам 260°–270° и 230°–240°. Остальные направления действия ГМН (320°–330°; 350°–360°) в трещинах проявились очень слабо (табл. 1).

Анализ данных, полученных при телефотодокументации скважин, показал, что наряду с преобладающими направлениями ГМН (260°–270°, 230°–240°) хорошо выражены максимальные напряжения, ориентированные по азимутам 290°–300° и 350°–360°. Субмеридиональное направление проявляется только в верхнем геодинамическом этаже.

Для выявления ориентировки преобладающих ГМН важная роль принадлежит анализу ориентировки разломов [4–7]. Данное положение связано с тем, что разломы являются структурами разрушения, нарушающими сплошность массивов горных пород. Для формирования структур разрушения значения тектонических напряжений должны быть примерно в два раза больше, чем для возникновения трещин (структур предразрушения). Среди разломных тектонических структур надвига позволяют наиболее просто и точно выявить направление действия главного максимального напряжения, так как простирание надвига ориентировано строго перпендикулярно направлению ГМН.

Воронцовский надвиг в пределах рассматриваемого месторождения [1–3] заметно меняет свое направление. Выделение линейных участков надвига (линеаментов) с учетом дополнительных геологических материалов позволяет определить ориентировку действия максимальных напряжений. Выявлено, что по простиранию надвига выделяются четыре группы линеаментов. Если принимать, что все линеаменты отражают простирание надвигов (взбросов), то азимут падения соответствует ориентировке осей главных нормальных максимальных напряжений (ГМН).

Анализ ориентировки линеаментов Воронцовского надвига.

Азимут простирания, град.	200	220	320	355
Азимут падения, град.	290	310	230	265

Все группы линеаментов хорошо выражены, но существенно преобладают две ориентировки: 200° и 355°. Соответственно, следует полагать, что среди выявленных направлений действия ГМН преобладают субширотные направления с ориентировкой 265° и 290°.

Если опираться на общие закономерности напряженного состояния (НС) по Уральскому региону, то выводы можно несколько детализировать. Основными (нагружающими) направлениями действия ГМН являются два направления: 265° (260°–270°) и 290° (280°–300°). Направления ГМН 230° и 310° формируются в связи с геомеханическими процессами, возникающими в зоне хрупкой деформации земной коры. Соответствующие этим направлениям линеаменты разлома с простиранием 320°

и 220°, вероятно, имеют смешанную кинематику, т. е. являются взбросо-сдвигами, или сдвигами. Линеамент разлома с азимут простирания 220° испытывает правые (по часовой стрелке), сдвиговые движения под воздействием ГМН с ориентировкой 265°. Линеамент разлома с азимут простирания 310° испытывает левые (против часовой стрелки) сдвиговые движения под воздействием ГМН с ориентировкой 290° [5]. В целом следует считать, что результаты анализа ориентировки надвига хорошо согласуются с результатами анализа трещиноватости.

Северопесчанская залежь магнетитов (железородное месторождение) представляет собой сложное рудное тело сложной формы. Лежачий бок сложен известняками, андезит-базальтами. Висячем боку залегают однородные диориты. Тектоническое строение Северопесчанского месторождения довольно сложное. Разрывные нарушения представлены в основном меридиональными и кососекущими крутопадающими нарушениями. На месторождении в качестве основных [8] выделены пять субвертикальных систем трещин (табл. 2).

Анализ ориентировки систем трещин показывает, что большинство систем (четыре из пяти) группируются в два направления. Если считать эти направления сдвиговыми, то можно применить метод определения ориентировки главного напряжения, предложенный М. В. Гзовским [4]. Предполагая, что выделенные сдвиговые плоскости занимают вертикальное положение, можно ориентировку биссектрисы острого угла рассматривать как ориентировку ГМН. Получим, что направление главного максимального напряжения составляет 283°. Данное направление соответствует результатам анализа структур Воронцовского надвига.

При решении ряда методических вопросов, связанных с горным давлением, Северопесчанское железорудное месторождение являлось своеобразным полигоном для Института горного дела (теперь ИГД УрО РАН). На месторождении выполнено довольно большое количество измерений напряженного состояния [8, 9] (табл. 3). Эти данные позволяют анализировать взаимосвязь значений главных напряжений, ориентировки осей главных напряжений и положение точек измерений по глубине геологического разреза.

Натурные измерения группируются в пять направлений. На глубинах ниже 400 м зафиксировано только два направления ГМН, близких к широтному. Необходимо указать, что к этим направлениям относятся измерения, зафиксировавшие самые высокие значения напряжений, которые больше 30 МПа (в табл. 3 выделены жирным шрифтом). Следует особо отметить, что азимуты измерений, имеющих субширотное направление ГМН, составляют 263°–270° и 280° (выделено в табл. 3). Можно полагать, что в субширотном направлении действия ГМН объединяются две сопряженные ориентировки – 260°–270° и 280°–290°.

На втором месте по степени выраженности находится субмеридиональное направление. Здесь зафиксировано и высокое значение максимального напряжения. Также следует отметить, что азимуты измерений, имеющих субмеридиональное направление ГМН, варьируют от 344° до 188° (8°). Можно по-

Таблица 2. Элементы залегания систем трещин.

Номер системы	Район съемки (порода)	Азимут простирания, град.	Угол падения, град.	Группировка азимута простирания, град.		Азимут ГМН, град.
I	Лежачий бок	135	80	325	323	283
III	Рудное тело	140	75–80	320		
II	Порфириды	235	85	235	243	
V	Диориты	250	75	250		
IV	Висячий бок	190	85	190	–	

лагать, что в этом направлении действия ГМН объединяются две сопряженные ориентировки главных разгрузочных напряжений (ГМРН) – 350°–360° и примерно 10°. Необходимо также отметить, что меридиональное направление фиксируется только в приповерхностной зоне хрупкой деформации (до глубины 300 м). Следует обратить внимание, что в интервале глубин 300–400 м достаточно четко фиксируется направление с азимутом 235°, т. е. близкое к выявленному ранее направлению 230°–240°. Указанный интервал глубин можно рассматривать как переходную зону между зонами хрупкой деформации и пластично-хрупкой деформации. Геомеханический смысл переходной зоны заключается в том, что геологический разрез Северо-Песчанского месторождения слагают преимущественно более крепкие, чем известняки, вулканогенные породы. Можно предполагать, что глубина зоны хрупкой деформации в районе этого месторождения развивается на глубину, которая заметно больше, чем в районе Воронцовского месторождения.

Направления ГМН в диапазоне азимутов от 300° до 330° выражены не так отчетливо, как другие направления действия максимального напряжения. Следует считать, что эти направления являются второстепенными (вспо-

верхности происходит трансформация поля напряжений. В разных блоках горных пород могут наблюдаться различные направления действия максимального напряжения. Нередко главное максимальное напряжение меняет свою ориентировку на 90° относительно основных направлений и приобретает субмеридиональную ориентировку. Остальные направления действия максимальных напряжений имеют вспомогательный характер.

Современные инженерно-геологические и гидрогеологические процессы и явления в скальных массивах очень часто связаны с напряженным состоянием скальных массивов. Наиболее интенсивные геодинамические явления в горных выработках (деформации, горные удары) происходят вблизи дизъюнктивных тектонических нарушений, активных в поле современных тектонических напряжений. Преобладающие направления действия ГМН определяют ориентировку активных разломов в поле современных напряжений. Наиболее выраженную активность проявляют сбросы и сдвиги.

Сбросы, как правило, имеют простирание, параллельное действию ГМН, поэтому наибольшую опасность представляют собой сбросы субширотного простирания. Сдвиги образуют с вектором действия ГМН углы скола, которые обычно имеют

Сравнительный анализ результатов геолого-структурных методов и натуральных измерений.

Интервал окружности, град.	230–240	240–260	260–270	270–280	280–290	290–310	310–320	320–340	340–10
Анализ трещин	●	–	●	–	●	–	○	○	⊙
Анализ надвига	⊙	–	●	–	●	–	⊙	–	–
Анализ НС	⊙	–	●	–	●	○	○	○	●

могательными) и проявляются только при трансформациях поля напряжений в верхнем геодинамическом этаже.

На основании сравнения результатов определений ориентировки осей главного максимального напряжения на Воронцовском и Северо-Песчанском месторождениях можно выполнить анализ соответствия результатов геолого-структурных методов и прямых натуральных измерений. Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о практически полном совпадении результатов определений.

Таким образом, комплексное использование геолого-структурных и геомеханических методов изучения напряженного состояния массивов горных пород позволяет надежно определить закономерности ориентировки главных максимальных тектонических напряжений в породных массивах. Основные направления действия главного максимального напряжения имеют субширотные ориентировки 260°–270° и 280°–290°. Вблизи земной

диапазон значений 35°–45°. Анализ элементов залегания сдвиговых нарушений показывает, что ГМН с ориентировкой 260° активизирует сдвиги, имеющие среднее простирание 220°, а ГМН с ориентировкой 285° активизирует сдвиги со средним простиранием 325°. Таким образом, повышение надежности выявления активных разломов позволяет прогнозировать расположение водоносных зон и неустойчивых участков в горных выработках.

ЛИТЕРАТУРА

- Абатурова И. В., Афанасиadi Э. И. Опыт инженерно-геологического районирования территории строительства Воронцовского ГОКа с целью рационального использования и охраны геологической среды // Изв. УГГА. Геология и геофизика. 2001. С. 241–246.
- Абатурова И. В. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых горно-складчатых областей. Екатеринбург: УГГУ, 2011. 226 с.
- Абатурова И. В., Афанасиadi Э. И. Методические аспекты изучения карста при разведке Воронцовского золоторудного месторождения на Север-

Таблица 3. Фактические данные о напряженном состоянии массива горных пород Северо-Песчанского железорудного месторождения.

Глубина, м	Азимут σ_x	σ_x , МПа	σ_y , МПа	σ_z , МПа	Глубина, м	Азимут σ_x	σ_x , МПа	σ_y , МПа	σ_z , МПа
0	186	9,6	1,5	0,0	370	234	6,6	0,3	10,3
300	270	10,3	7,9	7,0	326	234	14,0	9,7	10,5
380	303	13,0	8,0	11,3	300	344	15,5	7,8	6,9
430	270	16,3	12,5	15,5	300	270	41,5	5,1	16,1
500	270	21,1	17,6	0,0	430	263	49,0	9,0	6,0
370	326	14,0	6,4	0,0	135	330	18,7	17,9	12,5
360	230	17,4	9,0	12,0	700	280	33,5	13,2	16,0
170	188	21,2	7,3	12,8	247	305	6,4	6,2	2,2
125	298	3,3	2,1	4,0	192	185	13,7	6,6	3,7
180	215	20,4	10,2	7,0	295	180	31,3	25,2	9,5

ном Урале // Проблемы современной инженерной геологии: записки Горного института. 2003. Т.153. С. 43–45.
 4. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 535 с.
 5. Тагильцев С. Н., Лукьянов А. Е. Геомеханическая роль тектонических разломов и закономерности их пространственного расположения // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф. (12–14 окт. 2011 г.). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. С. 26–39.
 6. Hachay O. A., Khachay A. Yu. Construction of dynamical Model for Evolution of Rock Massive State as a Response on a Changing of stress-deformed State // Geophysical Research abstracts. 2010. Vol. 12. P. 2662. EGU2010-2662.
 7. Тагильцев С. Н., Лукьянов А. Е. Гидрогеологическое расслоение скального массива в условиях современного напряженного состояния // Литосфера. 2010. № 2. С. 122–129.
 8. Сашурин А. Д. Геомеханические модели и методы расчета смещений горных пород при разработке месторождений в скальных массивах: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 1995. 357 с.
 9. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра, 1994. 208 с.

REFERENCES

1. Abaturova I. V., Afanasiadi E. I. 2001, *Opyt inzhenerno-geologicheskogo rayonirovaniya territorii stroitel'stva Vorontsovskogo GOKa s tsel'yu ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany geologicheskoy sredy* [Experience in engineering-geological zoning of the construction site of Vorontsovsky Mining and enrichment plant with the purpose of rational use and protection of the geological environment]. *Izv. UGGGA. Geologiya i geofizika* [News of the Ural State Mining University. Series Geology and Geophysics], pp. 241–246.
 2. Abaturova I. V. 2011, *Otsenka i prognoz inzhenerno-geologicheskikh usloviy mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh gorno-skladchatykh oblastey*

[Estimation and forecast of engineering-geological conditions of deposits of solid minerals of mountain-folded areas], Ekaterinburg, 226 p.
 3. Abaturova I. V., Afanasiadi E. I. 2003, *Metodicheskie aspekty izucheniya karsta pri razvedke Vorontsovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya na Severnom Urale* [Methodical aspects of karst exploration during exploration of the Vorontsovsky gold deposit in the Northern Urals]. *Problemy sovremennoy inzhenernoy geologii: zapiski Gornogo instituta* [Problems of modern engineering geology: Journal of Mining Institute], vol.153, pp. 43–45.
 4. Gzovskiy M. V. 1975, *Osnovy tektonofiziki* [Fundamentals of tectonophysics], Moscow, 535 p.
 5. Tagil'tsev S. N., Luk'yanov A. E. 2012, *Gesmekhanicheskaya rol' tektonicheskikh razlomov i zakonornosti ikh prostranstvennogo raspolozheniya* [The gemechanical role of tectonic fractures and patterns of their spatial location]. *Geomekhanika v gornom dele: dokl. nauch.-tekhn. konf. (12–14 okt. 2011 g.)* [Geomechanics in mining: reports of scientific-technical conference(12-14 October 2011)], Ekaterinburg, pp. 26–39.
 6. Hachay O. A., Khachay A. Yu. 2010, Construction of dynamical Model for Evolution of Rock Massive State as a Response on a Changing of stress-deformed State. *Geophysical Research abstracts*, vol. 12, p. 2662.
 7. Tagil'tsev S. N., Luk'yanov A. E. 2010, *Gidrogeologicheskoe rassloenie skal'no-go massiva v usloviyakh sovremennogo napryazhennogo sostoyaniya* [Hydro-geological stratification of the rock massif in the conditions of the current stress state]. *Litosfera* [Litosfera], no. 2, pp. 122–129.
 8. Sashurin A. D. 1995, *Geomekhanicheskie modeli i metody rascheta sdvizheniy gornyykh porod pri razrabotke mestorozhdeniy v skal'nykh massivakh: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Geomechanical models and methods for calculating the movements of rocks in the development of deposits in rock massifs: dissertation of Doctor of technical sciences], Ekaterinburg, 357 p.
 9. Vlokh N. P. 1994, *Upravlenie gornym davleniem na podzemnykh rudnikakh* [Control of mining pressure in underground mines], Moscow, 208 p.

Сергей Николаевич Тагильцев,
 tagiltsev@k66.ru
Татьяна Николаевна Кибанова,
 kibanova_1@mail.ru
 Уральский государственный горный университет
 Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Sergey Nikolaevich Tagil'tsev,
 tagiltsev@k66.ru
Tat'yana Nikolaevna Kibanova,
 kibanova_1@mail.ru
 Ural State Mining University
 Ekaterinburg, Russia