

## К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА НИЖНЕКАНСКОГО РЕГИОНА

*Аркадий Васильевич Леонтьев*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, ведущий научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: leon@misd.ru

*Екатерина Владимировна Рубцова*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, старший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 174, e-mail: rubth@misd.ru

*Александр Александрович Скулкин*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: chuht@yandex.ru

Практическая геомеханика в оценках геомеханического состояния породной среды базируется на комплексном подходе, который предполагает привлечение результатов геологических, сейсмологических, геофизических и прочих наблюдений с тем, чтобы повысить достоверность аналитических решений, а также обеспечить полноту и качество интерпретации данных инструментального контроля. В работе приводится пример реализации подобного подхода. При оценке напряженно-деформированного состояния Нижнеканского региона использованы сведения о геологической характеристике объекта, а также данные о проявлениях сейсмичности и сеймотектонических деформаций земной коры в Алтае – Саянском регионе, а также в Байкальской рифтовой зоне. В результате системного интегрированного анализа геологической и сеймотектонической информации установлено, что область сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты в районе Нижнеканского гранитоидного массива следует отнести к региону со средней степенью тектонической активности. Для территории правобережья Енисея характерно региональное поле сжатия близширотной ориентировки. Приведены результаты инструментального контроля напряжений методом измерительного гидроразрыва в локальных зонах породного массива на глубине 260 м. Установлено, что массив обладает существенным запасом прочности по отношению к параметрам действующего поля напряжений.

**Ключевые слова:** массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, разломно-блоковая структура массива, сеймотектонические деформации земной коры, измерительный гидроразрыв.

## TO THE ESTIMATE OF STRESS-STRAIN STATE OF THE ROCK MASS IN THE NIZHNEKANSKY REGION

*Arkady V. Leontyev*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Leading Researcher, Laboratory of Mining Informatics, phone: (383)205-30-30, extension 173, e-mail: leon@misd.ru

***Yekaterina V. Rubtsova***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Senior Researcher, laboratory of Mining Informatics, phone: (383)205-30-30, extension 174, e-mail: rubth@misd.ru

***Aleksandr A. Skulkin***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Laboratory of Mining Informatics, phone: (383)205-30-30, extension 173, e-mail: chuht@yandex.ru

Practical geomechanics is based on an integrated approach, which assumes involving the results of geological, seismological, geophysical and other observations in order to increase the reliability of analytical solutions and to ensure the completeness and quality of interpretation of instrumental control data. The paper provides an example of the implementation of such an approach. When assessing the stress-strain state of the Nizhnekansky region, information on the geological characteristics of the object, as well as data on seismicity and seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai – Sayan region and Baikal rift zone were used. As a result of a systematic integrated analysis of geological and seismotectonic information, it was found that junction of the Siberian platform and the West Siberian plate in the area of Nizhnekansky granitoid massif should be related to a region with an average degree of tectonic activity. The territory of the right bank of the Yenisei is characterized by a regional compression field of near-latitudinal orientation. The results of instrumental stress control by hydraulic fracturing method in local zones of the rock mass at a depth of 260 m are presented. It is determined that the rock mass has a significant margin of safety with respect to the parameters of active stress field.

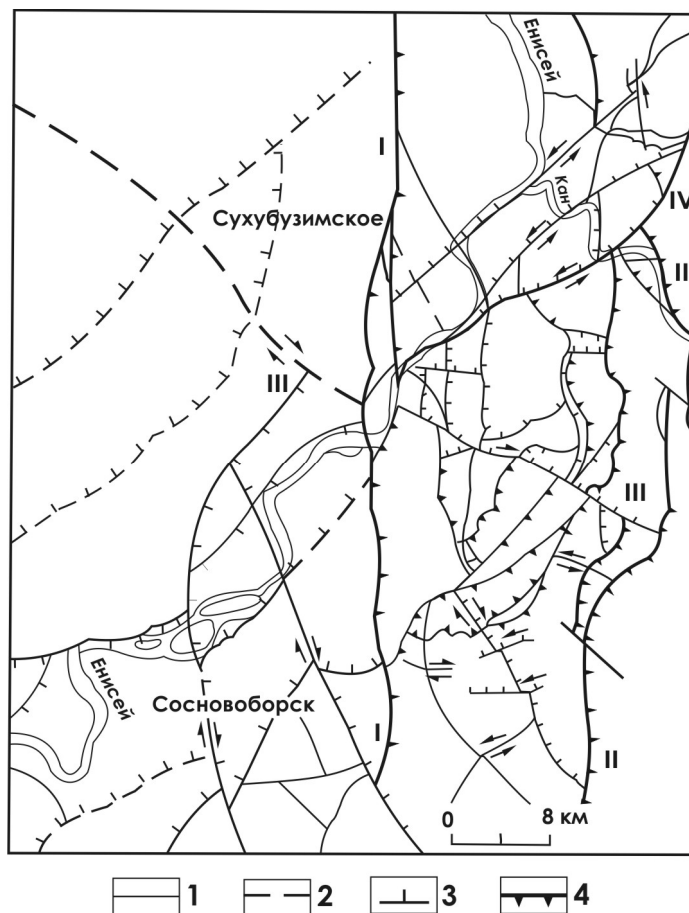
**Key words:** rock mass, stress-strain state, fault block structure, seismotectonic deformations of the Earth's crust, measuring hydraulic fracturing.

Нижнеканский регион приурочен к Атамановскому горному хребту, являющемуся отрогом Енисейского кряжа Саянских гор. Он характеризуется наличием мощного горного массива, разделенного р. Енисей и множеством мелких разнонаправленных водотоков. Для анализа выделим блок со следующими границами: с западной стороны – русло р. Енисей, сопровождающее глубинный Атамановский разлом древнего заложения; с северо-восточной стороны – русло р. Шумиха, а с юга – русло ручья Студеный. Русла этих рек приурочены к разрывным неотектоническим нарушениям с признаками современной, вялотекущей активности [1].

Породный массив сложен преимущественно биотитовыми гнейсами с высокими прочностными характеристиками, пронизанными мелкими дайками основного состава. Изредка гнейсы секутся маломощными (от 0.1 до 1.5 м) дайками порфиритов и более мощными (до 15 м) дайками диабазов. В целом, породы, вмещающие сооружения комбината, характеризуются как крепкие и весьма крепкие. Прочность образцов на сжатие достигает: для гнейсов 6–172 МПа, (среднее) – 98 МПа. Для диабазов – 140–165 МПа. Для порфиритов – 105–194 МПа, (среднее) – 150 МПа. Прочность гнейсов на разрыв 11–18 МПа, а на изгиб – 34 МПа.

Важное значение при анализе движений породного массива имеют сведения об его структурных особенностях и нарушениях. В тектоническом отношении район относится к Ангаро-Канскому сводово-глыбовому поднятию

байкалид южной оконечности Енисейского кряжа, представляющего выступ докембрийского фундамента древней Сибирской платформы. От Восточных Саян, Сибирской и Западно-Сибирской платформ Енисейский кряж отделяется глубинными разломами, состоящими из серии параллельных разрывов с амплитудами вертикальных смещений до нескольких километров (рисунок).



Карта разломов Нижнеканского гранитоидного массива и сопредельных территорий (Р.М. Лобацкая [1]):

Разломы достоверные (1), предполагаемые под чехлом кайнозойских отложений (2) и их кинематический тип: сбросы (3), взбросы и надвиги (4). Стрелки вдоль разломов указывают направление сдвиговых смещений в крыльях. Наименование разломов: I – Муратовский, II – Канско – Енисейский, III – Кантатский, IV – Нижнеканский. Толщина линий соответствует рангу разлома (чем толще линия, тем крупнее разлом), выделяются: генеральные, региональные, локальные разломы

Разломы ограничивают узкие, вытянутые преимущественно с севера на юг, блоки земной коры, ступенчато опускающиеся с востока на запад. Активность структур Енисейского кряжа в новейшую и современную эпоху проявляется различно. В северных его частях нарастает интенсивность опусканий и слабые подвижки по разломам, в южных – горизонтальные и вертикальные движения крупных блоков земной коры.

Среди последних работ геологов и геофизиков, посвященных изучению особенностей рассматриваемого региона, выделим исследования Р.М. Лобацкой, посвященные созданию карты неотектонической разломно-блоковой структуры зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты [1]. В частности, отмечена существенная роль разломов в формировании контрастных элементов рельефа по мере перехода от структур глобального уровня к региональному и локальному. Внутреннее строение зоны Байкало-Енисейского разлома определяется густой сетью локальных близмеридиональных и север-восточных надвиговых и сбросовых структур, имеющих, как правило, восточное падение. Система данных локальных разломов выкалывает серию микроблоков, вытянутых в близмеридиональном или северо-восточном направлениях. Ширина блоков изменчива и колеблется от 2 до 6–8 км. Расстояние между разломами близмеридиональной системы достаточно выдержанное и составляет 4–5 км между региональными структурами и около 2 км между локальными. Сеть локальных разломов заметно сгущается вблизи диагональных разломных структур, пересекающих и смещающих близмеридиональную систему. Тектонофизический анализ, выполненный Р.М. Лобацкой, показал, что для территории правобережья Енисея характерно региональное поле сжатия близширотной ориентировки, в условиях которого длительное время формировались меридиональные взброснадвиговые структуры Байкало-Енисейского разлома. Сдвиги более молодые, чем взброснадвижки, являются отражением изменения положения главных сжимающих напряжений в позднем плейстоцене – голоцене с близширотного на близмеридиональное.

Выскажем предположение, что существенно раздробленные мегаблоки свидетельствуют о перенесенных больших нагрузках. За счет своих граничных перемещений или поворотов они не смогли выдержать действующие нагрузки и вынуждены были «сломаться», организовывая новые поверхности ослабления и приобретая новые свободы для движений. Крупные и целые мегаблоки под действием изменяющихся нагрузок продолжают уходить от высокой концентрации напряжений в них за счет перемещений по границам (поднятия, сдвиги, повороты), сохраняя при этом свою целостность. В них возможна концентрация напряжений, кроме того, они склонны к подвижкам и, наконец, их возможное разрушение еще впереди.

В качестве источников формирования напряженно-деформированного состояния массива в правобережной области Енисея являются, по-видимому, проявления сейсмичности и сеймотектонических деформаций земной коры в Алтае – Саянском регионе, а также в Байкальской рифтовой зоне.

Анализ параметров механизмов очагов наиболее сильных землетрясений в восточной части Алтае – Саянской области, где надежно регистрируются все землетрясения с  $M \geq 3.5$ , выполненный О.А. Кучай в Институте геофизики СО РАН, позволил выявить закономерности регионального поля напряжений. В восточной части области, охватывающей горные системы Западного и Восточного Саян, а также Туву с прилегающими к ней районами Северной Мон-

голии, близгоризонтальные сжимающие напряжения ориентированы преимущественно в меридиональном или СВ-ЮЗ направлениях.

Оценить роль рифтогенных процессов в Байкальском регионе достаточно сложно в связи с тем, что в настоящее время не определено соотношение между пассивным и активным рифтингом. По данным П.Г. Дядькова (Институт геофизики СО РАН) в зависимости от того, какой механизм преобладает, могут несколько меняться и механизмы воздействия на земную кору областей, окружающих эту рифтовую зону. Не исключено, что кроме действия постоянных региональных напряжений, источниками которых являются Индо – Евразийская коллизия и активный рифтинг, можно ожидать во внутриконтинентальных областях Евразии, в том числе в Нижнекамском регионе, изменений поля региональных напряжений во времени в какой-то степени аналогичных тем, что наблюдались в Байкальском регионе. Направление действия этих сил – запад или северо-запад.

Инструментальный контроль напряжений, присутствующих в массиве, произведен в окрестности подземных выработок предприятия. Задача определения параметров поля напряжений в нетронутым массиве не ставилась, т.к. для этого требовалось сооружение специальных выработок на значительном удалении от существующих. Базовое значение для величины естественных напряжений дает аналитическая оценка вертикальной компоненты по весу вышележащей толщи пород, равная

$$\sigma_{\text{верт.}} = \rho_{\text{ср.}} \cdot H = 2.72 \text{ г/см}^3 \times 260 \text{ м} = 7.08 \text{ МПа},$$

где  $\rho_{\text{ср.}}$  – плотность горной породы;  $H$  – глубина от земной поверхности.

Таким образом, в процедуре оценки напряжений основное внимание уделено определению уровня напряжений, действующих в горизонтальной плоскости, в локальных областях массива. При определении напряжений использован опыт применения метода измерительного гидроразрыва и комплекс приборов и оборудования (ИВК) «Гидроразрыв», созданный в ИГД СО РАН [2, 3].

Первоначальная серия экспериментов была выполнена из вспомогательных выработок сечением порядка  $10 \text{ м}^2$ . Замерные станции в каждом пункте наблюдений, как правило, содержали одну вертикальную и две ортогональные скважины в горизонтальной плоскости. Массив пород был представлен биотитовыми гнейсами, прошитый дайками диабазы либо пироксенового порфирита.

Получены следующие данные о величинах присутствующих напряжений (таблица). Наиболее удачными оказались опыты в вертикальных скважинах. В данной серии экспериментов установлено действие в массиве почти равнокомпонентного поля горизонтальных напряжений в 1.5–2.8 раза превышающих значение вертикальной компоненты. Их повышенный уровень обусловлен рядом причин. А именно, концентрацией напряжений вокруг близрасположенных выработок большого сечения; присутствием даек с повышенной прочностью пород; тектоническими силами. Оценить на данном этапе исследований степень влияния каждого из этих факторов на величину напряжений было затрудни-

тельно, ввиду ограниченного числа опытов. Наиболее высокие горизонтальные напряжения установлены в глубине массива на удалениях 9.0 – 14.0 м от контура выработок. В ближней зоне (на глубинах до 8.0 м) отмечены области разгрузки.

Результаты определения напряжений вблизи  
вспомогательных выработок малого сечения

Расстояние от устья скважины, м	Общее количество выполненных тестов	Диапазон установленных величин напряжений, МПа	
		$\sigma_{\min}$	$\sigma_{\max}$
5.5 – 10.5	6	7.2 – 16.2	5.6 – 21.3
3.0 – 13.5	29	9.2 – 19.6	11.2 – 21.4
1.5 – 14.0	11	10.2 – 15.2	11.1 – 20.7
3.0 – 14.0	8	5.9 – 14.0	6.9 – 20.7

Следующая серия экспериментальных работ была выполнена в массиве, прилегающем к боковым стенкам протяженных технологических камер, сечением порядка 150 м<sup>2</sup>. Геолого-структурное строение породного массива здесь достаточно сложное и характеризуется наличием мощных зон дробления и рассланцевания. В этих зонах породы разбиты на плитки мощностью 1–15 см с интенсивной хлоритизацией по плоскостям рассланцевания и многочисленными зеркалами скольжения. Между плитками наблюдаются тонкие прослойки талька и хлоритовой глины пластичной структуры.

В зоне дробления гнейсы участками превращены в чистую глину с тальком, а отдельные глыбы и щебенка гнейсов сильно хлоритизированы и сцементированы пластичной глиной. Изверженные породы представлены несколькими дайками сильно измененного пироксенового порфирита мощностью от 0.8 до 1.5 м. Дайки пересекают зоны дробления и рассланцевания. Азимут падения даек Ю – В 110<sup>0</sup>, угол падения 60<sup>0</sup>. Устойчивость пород в основном слабая. Коэффициент крепости пород зоны дробления по шкале М.М. Протоджяконова составляет 1.5–2.0, в зоне рассланцевания 2.0. Под влиянием влаги глинистый цемент обеих зон перешел в пластичное состояние и преопределил склонность пород к обрушению.

Из анализа стратиграфии скважин ясно, что получение точных оценок геомеханического состояния подобного массива весьма затруднительно. Тем не менее, было выполнено 28 тестов измерительного гидроразрыва. Обработка экспериментальных данных проводилась по методике, которая в зарубежной литературе известна под названием FPM (Fracture Pressurization Method) или НТРФ (Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures) [4, 5].

Во время гидравлических тестов оценивался единственный параметр – уровень нормальных напряжений к плоскости трещины. Если давление запаривания трещины фиксировалось неуверенно, осуществлялся низкоскоростной ре-

жим нагнетания с регистрацией давления распространения трещины. Низкоскоростной режим применялся для того, чтобы распределение жидкости по длине трещины было близко к равномерному. В этом случае считалось, что критическое давление жидкости, необходимое для роста протяженной трещины, близко к величине нормального давления. Анализ полученных результатов позволил сделать следующее заключение. Уровень действующих во вмещающем массиве напряжений находится в интервале 0.73 – 6.00 МПа (среднее значение 2.96 МПа). Следовательно, с большой долей вероятности можно предполагать, что на свод камер действует вертикальная составляющая напряжений порядка 7.0 МПа, а на боковые стенки – порядка 3.0 МПа.

### *Заключение*

1. В результате системного интегрированного анализа геологической и сейсмотектонической информации установлено, что область сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты в районе Нижнеканского гранитоидного массива следует отнести к региону со средней степенью тектонической активности. Для территории правобережья Енисея характерно региональное поле сжатия близширотной ориентировки.

2. Сопоставление установленных в ходе экспериментальных натурных исследований величин максимальных напряжений, установленных в массиве ( $\sigma_{\max}^{cp} = 21.4$  МПа), с показателями предела длительной прочности основных представителей пород, какими являются гнейсы и порфиристы ( $\sigma_{\max}^{cp} = 149.6$  МПа), позволяет заключить, что породный массив по отношению к силовому полю естественных напряжений имеет существенный запас прочности.

3. При освоении подземного пространства Нижнеканского региона следует иметь в виду, что из-за присутствия в массиве зон раздробленности и расщепления, повышенные напряжения скорее сосредоточены в скелете прочных ненарушенных пород и их концентрация не высокая, т.к. непрерывно возможна релаксация напряжений за счет подвижек породных блоков по зонам нарушенности.

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИГД СО РАН (проект № 0321-2018-0001).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобацкая Р.М. Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46. – № 2.
2. Леонтьев А.В., Попов С.Н. Опыт практического применения измерительного гидро-разрыва // Горный журнал. – 2003. – № 3.
3. Леонтьев А.В., Рубцова Е.В., Леконцев Ю.М., Качальский В.Г. Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 1. – С. 104–110.

4. Haimson B.C., Cornet F.H. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation – Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTRF) // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003. – № 4. – P. 1012-1020.

5. Cornet F.H. Stress Determination from Hydraulic Tests on preexisting Fractures – the HTPF Method // Proc. Int. Symp. On Rock Stress and Rock Stress Measurements. – Lulea: Center Publishers. – 1986.

© *А. В. Леонтьев, Е. В. Рубцова, А. А. Скулкин, 2020*