

УДК 622.831

И.Ю. Розанов, Р.Н. Достовалов, М.А. Кузнецов

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ GNSS И СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В КАРЬЕРЕ РУДНИКА
«ЖЕЛЕЗНЫЙ» АО «КОВДОРСКИЙ ГОК»**

Изложен опыт организации геомеханического мониторинга с применением GNSS и светодальномерных наблюдений в карьере рудника «Железный». Приводятся данные о расположении, конструкции фундаментальных реперов полигона, применяемых комплексах аппаратуры, методики выполнения измерений и обработки получаемых результатов. Рассчитаны погрешности результатов светодальномерных и GNSS-измерений. По результатам многолетних наблюдений внесены коррективы в схему геомеханического районирования, выполненную на месторождении по данным инженерно-геологических исследований. Указывается, что необходимо продолжать проведение измерений для установления критических значений параметров деформирования массива пород, при которых необходимо применять меры для обеспечения безопасности ведения горных работ. Ключевые слова: открытые горные работы, карьер, геомеханический мониторинг, деформации массива горных пород, GNSS-наблюдения, светодальномерные наблюдения.

Как известно горные предприятия находятся в сложном взаимодействии с окружающей средой и образуют природно-технические системы (ПТС), характеризующиеся разносторонними внутренними связями.

При этом под природно-технической системой стоит понимать совокупность объектов, созданных природой и человеком и вовлеченных в единый процесс освоения недр (недропользования) [1].

В существенной степени состояние ПТС определяется геодинамическим состоянием массива горных пород, вмещающего эксплуатируемые месторождения, которое находится в непрерывном изменении в результате выемки и перемещения значительных масс полезных ископаемых и пород, нарушения естественного напряжённого состояния и свойств массива пород, нарушения природных гидрогеологических и газовых режимов массивов пород, а также в результате воздействия различных технологических процессов.

Негативные изменения состояния ПТС проявляются в общем ухудшении экологической обстановки региона, а также в снижении уровня безопасности ведения горных работ на горных предприятиях.

В частности, для условий рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» весьма актуальной проблемой является контроль и обеспечение устойчивости бортов карьера.

В результате исследований, выполненных Горным институтом КНЦ РАН на руднике «Железный» в период с 1998 по 2003 год, было предложено на отдельных участках контура карьера, благоприятных по инженерно-геологическим условиям, увеличить углы откоса уступов до вертикальных, а углы наклона бортов в целом до 60 градусов. Рекомендации были реализованы и в настоящее время около 30 % контура карьера формируется бортами с вертикальными уступами [2].

Однако формирование высоких карьерных бортов уступами с повышенными углами откосов повышает риск потери устойчивости и развития процессов обрушения и поэтому требует организации специальных систем геомеханического мониторинга состояния массива пород. Методы такого мониторинга могут быть самыми различными. Например, различные виды геодезических наблюдений.

Для проведения геодезических измерений в карьере рудника «Железный» был заложен светодальномерный полигон (рис. 1 см. Приложение, с. 446) [3, 4].

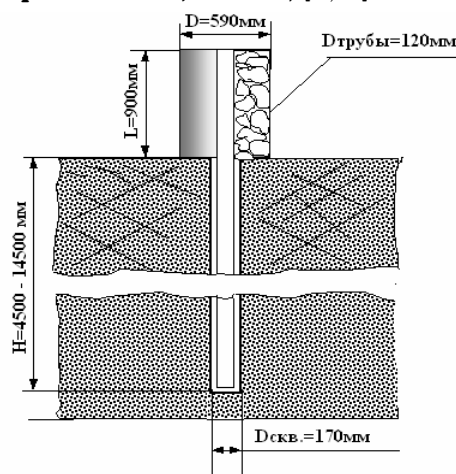


Рис. 2. Конструкция фундаментальных пунктов светодальномерного полигона

Места расположения фундаментальных пунктов были выбраны с учетом пространственного расположения крупных структурных неоднородностей в пределах карьера в соответствии с имеющейся на тот момент схемой расположения крупных структурных неоднородностей. При выборе места заложения пунктов также учитывались условия обеспечения прямой видимости между пунктами, наличие подъездных путей и удобства подхода к ним.

Фундаментальные пункты (рис. 2) представляют собой вертикальные скважины диаметром 170 мм и глубиной до 15 м.

В скважинах забетонированы 4-х метровые металлические конструкции. Над скважинами сооружалась бетонная монолитная тумба высотой 0,9 м. На выступающий конец внутренней трубы наваривалась специальная конструкция для установки светодальномера и отражателей, а также приемных антенн при проведении GNSS-измерений.

Необходимо отметить, что при проведении наблюдений используются два пункта маркшейдерской сети — 220А и 295Б (рис. 1). Они представляют собой металлический столик, состоящий из трубы диаметром 90—100 мм и приваренной плоской металлической пластиной размером 20×20 см.

В качестве основного метода контроля геомеханического состояния массива горных пород карьера рудника «Железный» был принят метод лазерной светодальнометрии, в соответствии с которым измеряются расстояния между фиксированными пунктами. Основное преимущество этого метода заключается в исключении погрешностей, возникающих при уклонении отвесной линии от вертикали вследствие гравитационной неоднородности массива пород, резко усугубляемой ведением горных работ и образованием полостей в породном массиве.

До 2013 года измерения выполнялись светодальномером «Мекометр 5000» с погрешностью $\pm(0,38+0,68 \cdot D)$ мм.

В настоящее время расстояния между пунктами измеряются с помощью электронного тахеометра Elta[®]S-10 фирмы Carl Zeiss, который характеризуется точностью измерения горизонтальных и вертикальных углов 1», расстояний – $\pm(1 \text{ мм} + 2 \text{ мм на } 1 \text{ км})$.

В качестве основной методики принято измерение линии двумя приемами, состоящими из четырех отсчетов. Линии измеряются в прямом и обратном направлениях. При этом температура и атмосферное давление воздуха фиксируются перед каждым приемом в месте стояния инструмента. Контроль результатов измерений осуществляется путем сравнения длин (прямо и обратно) Величина расхождений длин не должна превышать заявленной точности инструмента.

К настоящему времени выполнено 16 циклов наблюдений. На рис. 3 (**см. Приложение, с. 446**) представлены графики изменения расстояний между фундаментальными пунктами.

Изменения расстояний между фундаментальными пунктами от цикла к циклу характеризуют изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива пород в масштабах всего борта карьера. При этом результаты наблюдений свидетельствуют, что общая тенденция изменений расстояний между пунктами, практически, во всех циклах заключается в их уменьшении, т.е. наблюдаются сближения бортов карьера.

Это подтверждает, прежде всего, непрекращающееся развитие геомеханических процессов в приконтурном массиве бортов карьера, а различие величин сближений различных пунктов говорит о различной динамике отдельных блоков приконтурного массива.

Максимальные величины сближений бортов к настоящему времени составляют 260 мм. Они наблюдаются в южной части контура карьера, где сейчас сосредоточены горные работы.

GNSS-наблюдения в карьере рудника «Железный» начиная с 2008 года, выполняются 2 раза в год, практически одновременно со светодальномерными измерениями. Район работ, общая схема наблюдений и определяемые вектора показаны на рис. 4.

В табл. 1 указанно оборудование, используемое при GNSS наблюдениях.

Для снижения погрешностей измерений применяют дифференциальную коррекцию с использованием стационарного GNSS приёмника, установленного на базовой станции, т.е. в пункте, заведомо находящемся вне зоны деформирования контролируемого массива пород. Такая станция была оборудована в апреле 2011 года на крыше здания АБК (рис. 4).



Рис. 4. Район работ и схема GNSS наблюдений

Приёмник на базовой станции накапливает данные определений её координат в течение всего периода выполнения измерений, которые с помощью специальной программы учитываются при обработке данных мобильных приёмников, устанавливаемых на контролируемых пунктах.

Процесс GNSS-измерений заключается в регистрации с интервалом в 30 сек псевдодальностей до

Таблица 1

Комплект аппаратуры, используемой при GNSS наблюдениях

Оборудование	Особенности	Точность базовой линии (постобработка)
Lexon GGD (5шт)	20-канальный двухчастотный GPS/ГЛОНАСС приёмник, с интерфейсом MinPad	Гориз.: 3мм+1 ppm для L1+L2; 5мм + 1.5 ppm для L1 Вертик.: 5мм + 1.5 ppm для L1+L2; 6мм + 1.5 ppm для L1 Обрабатываемые сигналы: L1/L2 C/A и P код и фаза
Антенна JNS Choke Ring (5 шт.)	Рабочие полосы частот: 1565–1620 MHz (L1), 1215–1265 MHz (L2)	
Приемник Topcon GRS-1	GPS/ГЛОНАСС 72 канальный интегрированный GPS+ приемник	3 мм + 0,5 мм/км (L1+L2) (при использовании внешней антенны)
Внешняя антенна для Topcon GRS-1 PG-A1	PG-A1 является высокоточной двухсистемной (GPS/ГЛОНАСС) двухчастотной антенной геодезического класса с «прецизионной технологией микроцентрирования»	
Topcon Hyper+ (2шт)	40- канальный GPS/ГЛОНАСС, L1+L2, с редукцией «многолучевости» AMR, встроенная GPS/ГЛОНАСС антенна	Гориз. 3мм + 0.5мм/км (L1+L2) Вертик. 5мм + 0.5мм/км (L1+L2)

спутников системы GPS NAVSTAR на двух несущих частотах $L_1 = 1575,42$ МГц и $L_2 = 1227,60$ МГц, угол минимального возвышения спутников над горизонтом принят 10° . При этом, как правило, одновременно наблюдаются не менее 5 спутников, что позволяет уверенно обеспечивать качество выполняемых измерений.

Полученные данные обрабатываются при помощи пакета программ Pinnacle, разработанного фирмой — производителем используемой аппаратуры. В результате обработки определяются координаты точек наблюдений в различных системах координат (международной геодезической системе WGS-84, системе координат 1942 г. и др.). По изменению соответствующих компонент координат от цикла к циклу вычисляются перемещения пунктов.

При обработке результатов измерений необходимо учитывать, что координаты всех пунктов геомеханического полигона изменяются под воздействием трёх групп причин:

- глобальных перемещений Евроазиатской литосферной плиты $\Delta x_{\text{глоб}}$;
- техногенных перемещений вследствие выполнения горных работ $\Delta x_{\text{техн}}$;
- погрешностей GNSS-измерений $\Delta x_{\text{погр}}$.

Общие перемещения фундаментальных пунктов в этом случае могут быть выражены формулой:

$$\Delta X = \Delta x_{\text{глоб}} + \Delta x_{\text{техн}} + \Delta x_{\text{погр}}, \Delta Y = \Delta y_{\text{глоб}} + \Delta y_{\text{техн}} + \Delta y_{\text{погр}}. \quad (1)$$

Координаты базовой станции изменяются только под воздействием:

- глобальных перемещений Евроазиатской литосферной плиты $\Delta x_{\text{БСглоб}}$; $\Delta y_{\text{БСглоб}}$
- погрешностей GNSS-измерений $\Delta x_{\text{БСпогр}}$; $\Delta y_{\text{БСпогр}}$

$$\Delta X_{\text{БС}} = \Delta x_{\text{БСглоб}} + \Delta x_{\text{БСпогр}}, \Delta Y_{\text{БС}} = \Delta y_{\text{БСглоб}} + \Delta y_{\text{БСпогр}}. \quad (2)$$

При этом предполагается, что

$$\Delta x_{\text{глоб}} = \Delta x_{\text{БСглоб}}; \Delta y_{\text{глоб}} = \Delta y_{\text{БСглоб}}; \Delta x_{\text{погр}} = \Delta x_{\text{БСпогр}}; \Delta y_{\text{погр}} = \Delta y_{\text{БСпогр}}.$$

Отсюда для определения перемещений фундаментальных пунктов геомеханического полигона только в результате техногенных причин необходимо из общих перемещений каждого пункта вычитать соответствующие по времени перемещения базовой станции. Тогда окончательно техногенные перемещения (приведенные перемещения) фундаментальных пунктов определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{техн}} &= \Delta X - \Delta x_{\text{глоб}} - \Delta x_{\text{погр}} = \Delta X - \Delta x_{\text{БСглоб}} - \Delta x_{\text{БСпогр}} = \Delta X - \Delta X_{\text{БС}}. \\ \Delta y_{\text{техн}} &= \Delta Y - \Delta y_{\text{глоб}} - \Delta y_{\text{погр}} = \Delta Y - \Delta y_{\text{БСглоб}} - \Delta y_{\text{БСпогр}} = \\ &= \Delta Y - \Delta Y_{\text{БС}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Одним из основных условий применения методов космической геодезии для целей мониторинга деформационных процессов в условиях массивов скальных пород при малых значениях деформаций является получение результатов с достаточной точностью.

Поскольку GNSS-наблюдения выполняли на фундаментальных пунктах светодальномерного полигона и, практически, одновременно со светодальномерными измерениями, оценка точности GNSS-наблюдений может быть выполнена путём сравнения расстояний между пунктами, определенных по данным светодальномерных и GNSS-измерений.

Результаты этого сравнения показали, что в подавляющем большинстве случаев расстояния, определённые по GNSS-наблюдениям, превышают расстояния, измеренные светодальномером. При этом максимальные расхождения в результатах измерений составляют 20,7 мм.

Такие расхождения являются следствием различия систематических ошибок, свойственных светодальномерным и GNSS-наблюдениям, по своим величинам они являются неприемлемыми для контроля деформирования массивов скальных пород.

Однако если сравнивать не абсолютные величины расстояний, а их относительные изменения, то в этом случае систематические погрешности обоих методов исключаются и оценка применимости спутниковой геодезии может быть иной.

Чтобы правильно оценить изменения длин измеряемых расстояний, а затем перемещений массива, получаемых по результатам светодальномерных и GNSS-измерений, рассчитаем погрешности получаемых результатов.

Уравнение погрешности Мекометра-5000 (по результатам исследований инструмента в октябре 2006 г.) имеет вид:

$$m_{CB} = \pm(0,38 + 0,68 \cdot D), \text{ мм},$$

где D — измеряемое расстояние в километрах.

Тогда погрешность перемещений по светодальномерным измерениям будет:

$$m_{\Delta CB} = m_{CB} \cdot \sqrt{2} = \pm\sqrt{2} \cdot (0,38 + 0,68 \cdot D) \text{ мм}.$$

Аналогично погрешность перемещений по светодальномерным измерениям, выполненных тахеометром «EltaS10» будет:

$$m_{\text{тах}} = \pm\sqrt{2} (1 + 2D) \text{ мм}.$$

Погрешность определения расстояния по GNSS-измерениям (по техническим данным применяемой аппаратуры) составляет:

$$m_{GNSS} = \pm(3 + 1ppm) = \pm(3 + 1 \text{ мм на } 1 \text{ км}) \text{ мм}.$$

Тогда погрешность перемещений по GNSS-измерениям будет:

$$m_{\Delta GNSS} = m_{GNSS} \cdot \sqrt{2} = \pm\sqrt{2} \cdot (3 + 1ppm) \text{ мм}.$$

Общая погрешность сравнения перемещений будет:

$$M = \sqrt{2m_{CB}^2 + 2m_{GNSS}^2}, \text{ мм}.$$

Результаты вычислений погрешностей для всех расстояний между фундаментальными пунктами полигона приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчётные погрешности результатов светодальномерных и GNSS-измерений

Название стороны	Расстояния, км	$\Delta L_{CB} = \sqrt{2}m_L$		$\Delta L_{GNSS} = \sqrt{2}m_{GPS}$	$M = \sqrt{2m_L^2 + 2m_{GNSS}^2}$	
		ME	ELTA		ME	ELTA
VI – I	1,3	±1,8	±5,1	±6,1	±6,3	±7,9
VI – II	1,8	±2,3	±6,5	±6,8	±7,2	±9,4
VI – 220А	1,9	±2,4	±6,8	±6,9	±7,3	±9,7
VI – 295Б	1,5	±2,0	±5,7	±6,4	±6,7	±8,5
VI – V	1,0	±1,5	±4,2	±5,7	±5,9	±7,1
V – I	2,1	±2,6	±7,4	±7,2	±7,7	±10,3
V – II	2,3	±2,7	±7,9	±7,5	±8,0	±10,9
V – 220А	2,0	±2,5	±7,1	±7,1	±7,5	±10,0
V – 295Б	0,8	±1,3	±3,7	±5,4	±5,5	±6,5
295Б – I	2,1	±2,6	±7,4	±7,2	±7,7	±10,3
295Б – II	2,0	±2,5	±7,1	±7,1	±7,5	±10,0
295Б – 220А	1,3	±1,8	±5,1	±6,1	±6,3	±7,9
220А – I	1,4	±1,9	±5,4	±6,2	±6,5	±8,2
220А – II	0,9	±1,4	±4,0	±5,5	±5,7	±6,8
I – II	0,7	±1,2	±3,4	±5,2	±5,4	±6,2

Сопоставляя данные сравнения результатов светодальномерных и GNSS-измерений с данными таблицы 2 получаем, что из 210 значений 41, т.е. 19.5 %, превышают расчётные значения среднеквадратических погрешностей. Они свидетельствуют о каких-то неучтённых локальных причинах неточности измерений. По мере накопления статистики получаемых результатов предполагается выявить и по возможности устранить эти неучтённые факторы.

Таким образом, результаты наблюдений на карьере «Железный» говорят о реальной возможности применения метода GNSS – измерений для целей мониторинга процессов деформирования в скальных массивах горных пород.

Более того, накопленный опыт выполнения GNSS – измерений позволяет принять этот метод для мониторинга геомеханического состояния массивов скальных пород в качестве основного, учитывая его преимущества перед традиционными геодезическими методами, а методы классической геодезии (светодальномерные измерения высокоточное нивелирование) применять в качестве вспомогательных методов при высоких интенсивностях развития геомеханических процессов и в случае необходимости получения результатов с повышенной точностью и надёжностью.

В целом же проведение GNSS и светодальномерных наблюдений в карьере рудника «Железный» способствовали районированию карьера на северный и южный участок, причем границей раздела является самый крупный разлом R1. Участки существенно различаются по характеру развития сближений.

Максимальные величины сближений бортов к настоящему времени составляют 260 мм и максимальной скоростью сближений до 6 мм/мес. Они наблюдаются в южной части контура карьера, где сейчас сосредоточены горные работы. По оценке общего состояния массива пород, полученные значения можно считать не критическими.

Необходимо продолжать проведение измерений для выявления факторов, определяющих интенсивность развития геомеханических процессов и установления критических значений, при которых необходимо применять соответствующие меры для обеспечения безопасности горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каспарьян Э.В., Кожуховский А.В., Розанов И.Ю. Опыт организации мониторинга устойчивости бортов и уступов карьера // Известия вузов. Горный журнал. 2015. №5. С. 67–74.
2. Козырев А.А., Решетняк С.П., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Кампель Ф.Б. Обоснование рациональной конструкции конечного борта карьера рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. №3. С. 243–250.
3. Жиров Д.В., Рыбин В.В., Климов С.А., Мелихова Г.С., Завьялов А.А. Проведение комплексного инженерно-геологического районирования для обоснования объектов и видов работ по закреплению/стабилизации уступов карьера // Ч. 1. Инженерная защита. 2014. №2. С. 22-31.
4. Жиров Д.В., Рыбин В.В., Климов С.А., Мелихова Г.С., Завьялов А.А. Проведение комплексного инженерно-геологического районирования для обоснования объектов и видов работ по закреплению/стабилизации уступов карьера // Ч. 2. Инженерная защита. 2014. №3. С. 16-25. **ИИAB**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Розанов Иван Юрьевич — инженер, ivan-rozanov@yandex.ru,
Достовалов Роман Николаевич — технолог, 2737247@mail.ru,
Кузнецов Михаил Андреевич — ведущий технолог, misha.kuznetsov@gmail.com,
Горный институт Кольского научного центра РАН.



**THE EXPERIENCE OF GNSS AND OPTICAL DISTANCE OBSERVATIONS
APPLICATION TO STUDY THE ROCK MASS DEFORMATION IN THE OPEN
PIT OF THE «ZHELEZNY» MINE, JSC «KOVDORSKY GOK»**

Rozanov I.Iu., engineer, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences Apatity, ivan-rozanov@yandex.ru, Russia,
Dostovalov R.N., technologist, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences Apatity, 2737247@mail.ru, Russia,
Kuznetsov M.A., leading technologist, misha.kuznetsov@gmail.com, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences Apatity, Russia.

The experience of geomechanical monitoring with the use of GNSS and optical distance observations in the open pit of the Zhelezny mine is exposed. The data are given on the location and design of the precise reference marks of a testing site, used sets of equipment, and methods for measuring and processing results. The errors in results of optical distance and GNSS measurements have been calculated. As a result of long-term observations a scheme of geomechanical zoning made on a deposit after the engineering-geological research data has been corrected. Necessity is indicated to continue measuring in order to determine the critical values of rock mass deformation parameters at which measures should be taken to ensure the safety of mining operations.

Key words: open pit mining, open pit, geomechanical monitoring, deformation of rock mass, GNSS observations, optical distance observations.

REFERENCES

1. Kaspar'ian E. V., Kozhukhovskii A. V., Rozanov I. Iu. *Opyt organizacii monitoringa ustojchivosti bortov i ustupov kar'era* (Experience of the organization monitoring the sustainability of the boards and benches). *Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal*, 2015, No 5, pp. 67–74.
2. Kozyrev A. A., Reshetniak S. P., Kaspar'ian E. V., Rybin V. V., Kampel' F. B. *Obosnovanie racional'noj konstrukcii konechnogo borta kar'era rudnika «Zheleznyj» OAO «Kovdorskij GOK»* (Lift the grounding of the rational design of the final pit wall of the mine «Railways» JSC «Kovdor GOK»). *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2004, No. 3, pp. 243–250.
3. Zhiron D. V., Rybin V. V., Klimov S. A., Melikhova G. S., Zav'ialov A. A. *Provedenie kompleksnogo inzhenerno-geologicheskogo rajonirovaniya dlya obosnovaniya ob'ektov i vidov rabot po zakrepleniyu/stabilizacii ustupov kar'era* (A comprehensive engineering-geological zoning for the justification of the objects and types of works on fixation/stabilization benches). *Inzhenernaia zashchita*, 2014, no. 2, part 1, pp. 22–31.
4. Zhiron D. V., Rybin V. V., Klimov S. A., Melikhova G. S., Zav'ialov A. A. *Provedenie kompleksnogo inzhenerno-geologicheskogo rajonirovaniya dlya obosnovaniya ob'ektov i vidov rabot po zakrepleniyu/stabilizacii ustupov kar'era* (A comprehensive engineering-geological zoning for the justification of the objects and types of works on fixation/stabilization benches). *Inzhenernaia zashchita*, 2014, no. 3, part 2, pp. 16–25.