УДК 628.838:528.481

А.А.Козырев, Э.В.Каспарьян, В.А.Мальцев,
В.В.Рыбин, Е.Э.Каспарьян, Л.С.Каткова
Горный ин-т Кольского научного центра РАН, Россия

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Изложен метод создания наземных и подземных светодальномерных полигонов для геодинамического мониторинга при разработке апатитов в Хибинах.

Methods of earth's surface and underground light-distance-measurements poligons for geodinamics monitoring in apatite output in Khibin mountains are discribed.

Хибинские апатитовые месторождения, являющиеся крупнейшими в России по запасам фосфатного сырья, находятся в центральной части Кольского полуострова. Отработка месторождений ведется открытым и подземным способами с 30-х годов XX в. В настоящее время глубина горных работ достигает 700 м от дневной поверхности.

Геомеханическое состояние Хибинского массива характеризуется высоким уровнем горизонтальных тектонических напряжений, которые в несколько раз превосходят напряжения от собственного веса пород, что при склонности горных пород к упругому деформированию с последующим хрупким разрушением обусловливает динамические проявления горного давления как при ведении очистных работ, так и при проходке одиночных горных выработок, даже на верхних отрабатываемых горизонтах, расположенных выше уровня дна долин. Широко распространены в массиве геологические нарушения различного масштабного уровня, вблизи которых вероятность динамических проявлений горного давления повышается.

Многолетняя отработка Хибинских апатитовых месторождений несколькими близрасположенными рудниками и, как следствие, перемещение больших объемов горной массы на сравнительно небольшой площади (всего за 60 лет эксплуатации месторождений перемещено порядка 3 млрд т горных пород [3]) привели к изменению естественного геодинамического режима региона, подвижкам крупных блоков пород по тектоническим нарушениям, формированию новых трещин отрыва и, как следствие, ухудшению и без того непростых геомеханических условий отработки.

Стало заметно проявляться взаимное влияние очистных пространств сосед-

них рудников, ранее рассматривавшихся как независимые. Так, в настоящее время отрабатываются две стыковочные зоны: между Кировским рудником и Саамским карьером и между Расвумчоррским и Центральным рудниками. Последний случай является наиболее сложным, так как подземными горными работами подработан действующий борт карьера. Возросло количество мощных динамических явлений, происходящих непосредственно в пределах шахтных полей действующих рудников. Начали возникать горно-тектонические удары и техногенные землетрясения (техногенное землетрясение 1989 г.; серия горно-тектонических ударов и техногенное землетрясение в ноябре-декабре 1993 г. при отработке блока-целика на гор.+252 м Кировского рудника; землетрясение в октябре 1995 г. с эпицентром в карьере Центрального рудника с магнитудами $M = 2 \div 4{,}5$ [1,2]). Отмеченные особенности обусловливают необходимость надежного контроля геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород, для обеспечения безопасной отработки месторождений.

На рудниках ОАО «Апатит» накоплен большой опыт контроля геомеханического состояния массива горных пород с применением широкого комплекса различных методов [4]. Среди них особое место занимают методы геодезического контроля как весьма эффективные высокоточные способы получения непосредственных данных о деформациях и перемещениях массива пород. Главным преимуществом геодезических методов является возможность проводить измерения без потери точности в чрезвычайно широком диапазоне измерительных баз (от единиц метров до десятков километров). Кроме того, важнейшей особенностью геодезических методов является их глубокая методическая проработка в силу большой традиционности и многолетней истории развития. Вместе с тем геодезические измерения имеют и недостатки, которые в определенной степени ограничивают их возможности и сужают область применения. Наиболее существенными из них является

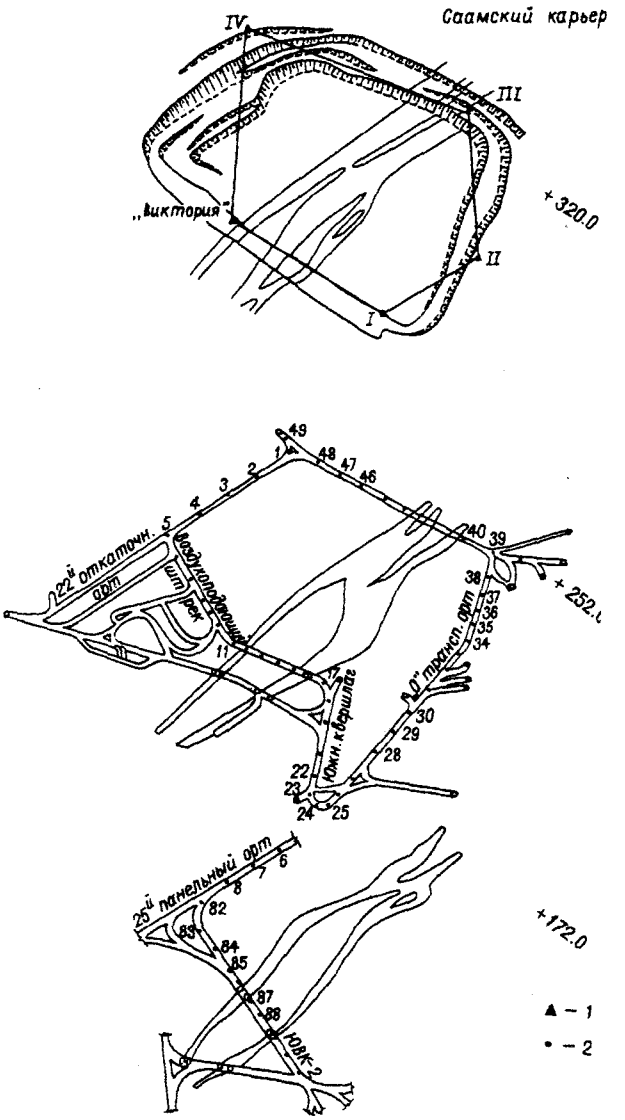


Рис.1. Схема закладки нивелирных и светодальномерных полигонов на Кировском руднике
1 – пункты светодальномерного полигона в Саамском карьере; 2 – пункты нивелирных полигонов в подземных выработках

дискретность и сложность автоматизации измерений.

С учетом всего изложенного основным способом для контроля деформационных процессов в подземных выработках рудников ОАО «Апатит» с конца 60-х годов принят метод высокоточного нивелирования. В настоящее время эти работы получили развитие и ведутся на специальных подземных полигонах Кировского рудника (рис.1). Два полигона, расположенных один над другим на откаточных горизонтах +172 и +252 м, были заложены соответственно в 1988 и 1995-1996 годах в районе крупного активного геологического нарушения – Саамского разлома.

Саамский разлом представляет собой зону шпреуштейнизированных пород, залегающую практически отвесно вкрест простирания рудного тела. Зона заполнена окисленными породами, имеющими весьма малую прочность по сравнению с породами массива. Мощность зоны на разных участках колеблется от 1 до 6 м.

Наблюдения на полигонах имеют своей целью установить наличие и размер смещений блоков, разделенных разломом, и отследить влияние на эти смещения технологических процессов горного производства, установив закономерности изменения напряженно-деформированного состояния массива. Общая длина полигона на гор.+172 м составляет в настоящее время 1,6 км, а полигона на гор. +252 м – 1,8 км.

Конструкция реперов позволяет с помощью специального замка надежно устанавливать рейку с инварной полосой. Реперы располагают за пределами ослабленной зоны, образующейся вокруг выработок в ходе ведения буровзрывных проходческих работ, путем бетонирования штанг реперов в той части пробуренного шпура, которая находится в ненарушенной части массива. Оставшаяся свободной часть штанги находится внутри обсадной трубы, предохраняющей репер от случайных повреждений.

Высокоточное нивелирование пунктов-реперов выполняется нивелиром Ni-007 три раза в год по методике, в основу которой положены требования при производстве нивелирования для создания государственных высотных сетей II класса. Отличия применяемой методики заключаются в более жестких требованиях к расхождениям превышений в прямом и обратном направлениях, вместе с тем отдельные требования государственных нормативных документов, в частности о времени суток выполнения работ и прохождении визирного луча вблизи поверхности земли, в подземных условиях выполнить практически невозможно.

Всего на гор.+252 м выполнено по замкнутому полигону 14 циклов наблюдений, при этом время проведения каждого цикла выбиралось таким образом, чтобы зафиксировать возможные перемещения пунктов сразу после окончания весенне-осенних паводков, значительно влияющих на общее состояние массива вследствие резких изменений гидрогеологических условий.

Результаты нивелирных наблюдений первично обрабатывались по обычной схеме, принятой для нивелировочных работ, а затем в виде таблиц превышений заносились в компьютер и далее обрабатывались с применением электронных таблиц, которые позволяют выполнить весь комплекс камеральной обработки и

представить результаты в виде таблиц относительных отметок реперов, ведомостей и графиков относительных смещений или скоростей смещений реперов по всему полигону в целом и для любого отдельно взятого репера в любой момент времени.

Систематизация и анализ результатов этих наблюдений дают возможность установить, что среднеквадратическая случайная погрешность на 1 км хода составляет ±1,05 мм. Среднеквадратическая погрешность на станции, т.е. фактическая ошибка определения отметки каждого репера по результатам наблюдений, равна в среднем ±0,20 мм/ст. Полученные за время наблюдений вертикальные смещения реперов на гор +252 м составляют от 1 до 9 мм.

Таким образом, во-первых, обосновано применение метода высокоточного нивелирования, которое в условиях действующего горного производства (работа вибропитателей, взрывные работы, активно функционирующая транспортная сис-

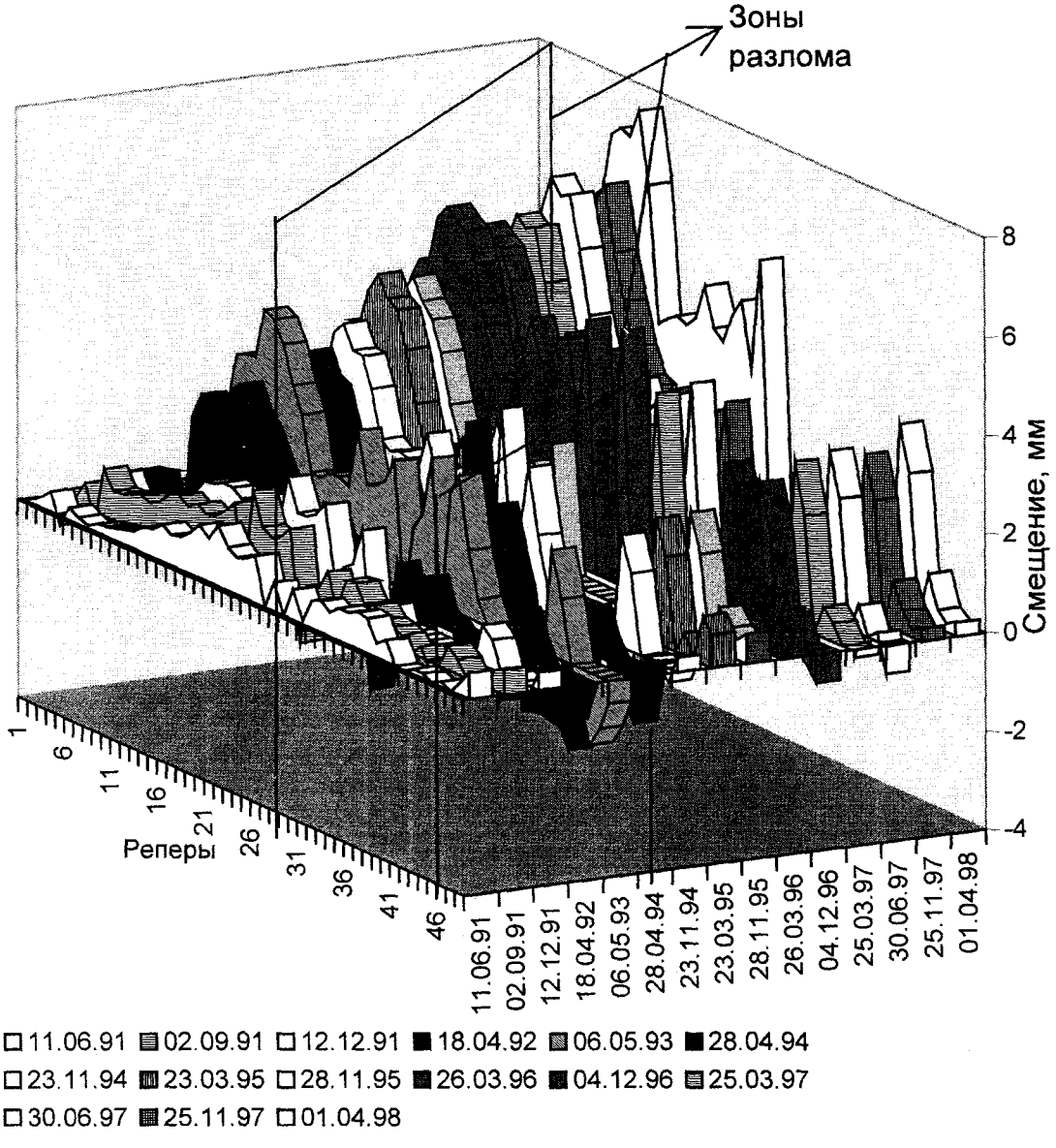


Рис.2. Смещения реперов на полигоне гор.+252 м Кировского рудника ОАО «Апатит» за 1991-1998 годы

тема) представлялось не вполне очевидным. Во-вторых, установлено пороговое значение $2\delta = \pm 0{,}4$ мм, выше которого смещения реперов следует рассматривать как достоверные перемещения массива пород. Дальнейшие наблюдения дадут, очевидно, данные о природе движения массива в районе крупного тектонического разлома и связанных с этим изменений его напряженно-деформированного состояния. Уже сейчас можно говорить о надежно зафиксированном поднятии реперов, заложенных по обе стороны разлома, относительно реперов, находящихся на удалении от него. Максимальное поднятие на гор. +252 м за 1991-1998 годы достигает 9 мм (рис. 2).

Особенности тектонического состояния массива, в частности высокая степень его напряженности, неизбежно ведут к проявлениям процессов неотектонических подвижек, фиксировавшихся и ранее по результатам высокоточного нивелирования (например, в Юкспорском тоннеле), однако до сих пор на границах структур, таких, сравнительно небольших масштабов, подобных явлений зафиксировано не было.

Зафиксированные подвижки (поднятия) реперов по нивелирным полигонам позволяют предположить, что причиной этих смещений является общее изменение напряженно-деформированного состояния контролируемой части массива. При этом, в принципе, возможно совместное действие двух процессов:

- разгрузка части массива, прилегающей к разлому, в результате отработки карьером запасов руды и пород вскрыши вышележащих горизонтов;
- перемещение структурных блоков по Саамскому разлому как результат действий тектонических сил и изменения общего напряженно-деформированного состояния контролируемой области массива за счет выемки больших объемов горной массы.

Определение роли и вклада этих процессов в наблюдаемые явления – поднятие реперов на подземных полигонах и перемещения пунктов в Саамском карьере – является задачей дальнейших исследований.

Поскольку нивелирные наблюдения обеспечивают измерение перемещений только в одном направлении (вертикальном), для получения более полной картины изменения напряженно-деформированного состояния контролируемого массива пород нивелирные полигоны в подземных выработках в 1995 г. были дополнены измерительным светодальномерным полигоном в Саамском карьере (см. рис.1).

В качестве основного метода наблюдений на поверхности был принят метод пространственной трилатерации. Основное преимущество метода заключается в исключении погрешностей за счет уклонения отвесной линии от вертикали вследствие гравитационной неоднородности массива пород, резко усугубляемой ведением горных работ и образованием многочисленных полостей в породном массиве. До недавнего времени применение этого метода сдерживалось отсутствием надежных высокоточных дальномеров.

Однако в нашем распоряжении с 1994 г. имеется лазерный светодальномер – мекометр-5000 (ME-5000) производства швейцарской фирмы «Керн», который предназначен для измерения расстояний от 20 до 8000 м и может применяться для выполнения высокоточных геодезиче-

Таблица 1

Результаты измерений на образцовом базисе I разряда

№ п/п	Наименование линии	Измерения инварными проволоками, м	Измерения МЕ-5000, м	Разность, мм
1	4256-4160	527,96586	527,96585	+0,01
2	4256-808	887,24954	887,24943	+0,11
3	4256-4401	1103,28375	1103,28402	-0,27
4	4256-4817	1487,02235	1487,02250	-0,15
5	4160-808	359,28368	359,28358	+0,10
6	4160-4401	575,31789	575,31747	+0,42
7	4160-4817	959,05849	959,05859	-0,02
8	808-4401	216,03421	216,03421	-0,38
9	808-4817	599,77281	599,77308	-0,27
10	4401-4817	383,73860	383,73850	+0,10

ских линейных измерений, в том числе и для эталонирования длин базисов с целью калибровки дальномерной техники. Высокие требования, предъявляемые к работе светодальномера ME-5000, а также уникальность прибора и недостаточный опыт его эксплуатации потребовали детального исследования точности измерений и влияния отдельных источников ошибок.

Поскольку внутренние приборные ошибки новейших дальномеров в значительной степени сведены к минимуму (составляют десятые доли миллиметра), основной вклад в суммарную погрешность измерений вносят внешние источники ошибок, в первую очередь, связанные с изменением коэффициента преломления воздуха в приземном слое атмосферы [5].

В конструкции мекометра ME-5000 используется стандартный эталон частоты и расстояния вычисляются для условий стандартной атмосферы (температура воздуха 15 °С, давление 760 мм рт.ст., содержание углекислого газа 0,03 % при сухом воздухе), для которых точно известен относительный показатель коэффициента преломления воздуха. При этом реальные атмосферные условия учитываются путем введения соответствующих поправок по данным метеонаблюдений.

Одним из основных вопросов при проведении исследований ME-5000 являлась разработка программы измерения длин линий и обеспечение необходимой точности с учетом изменения атмосферных процессов вдоль трассы прохождения светового луча. Кроме того, существенное внимание было уделено вопросам отработки специальной методики для определения параметров перемещений и деформаций массива пород, исходя из специфики деформационного мониторинга геомеханических процессов.

С этой целью в 1994-1995 годах были выполнены полевые исследования ME-5000 на образцовом базисе I разряда ЦНИИГАиК*, а для исследования работы ME-5000 при предельно коротких расстояниях были проведены лабораторные измерения на компараторе МК-1 в МИИГАиК**.

На образцовом базисе ЦНИИГАиК между пятью пунктами, расположенными

* Работы выполнялись при непосредственном участии сотрудника ГоИ КНЦ РАН О.Л. Черноусова и сотрудника ЦНИИГАиК Р.А.Татевяна.

** Работы выполнялись при непосредственном участии главного инженера ПГЦ «Астровега» В.И.Вайцекяна.

в створе, было измерено 10 отрезков в диапазоне от 216 до 1487 м. Мекометр и отражатели принудительно центрировались на пунктах при помощи специально изготовленных подставок. Измерения выполнялись сериями в разное время суток как в спокойных, так и в неблагоприятных метеорологических условиях. Каждый отрезок измерялся минимум четырьмя приемами по четыре отсчета в каждом. Обработка результатов измерений была выполнена на персональном компьютере по специально разработанной программе, при помощи которой вычислялись поправки в длины линий и оценивалась точность измерений.

Точность мекометра оценена в сравнении с результатами измерений инварными проволоками и характеризуется средней квадратической погрешностью $m = \pm(0{,}23 + 0{,}7\cdot10^{-7}D)$ мм, где D – дальность измерения. Оценка точности по внутренней сходимости результатов измерений отрезков базиса во всех комбинациях характеризуется относительной погрешностью $m = \pm(0{,}3 + 0{,}7\cdot10^{-7}D)$ мм. Результаты измерений приведены в табл.1.

Кроме того, исследовалась разрешающая способность ME-5000 на линии длиной около 370 м путем измерения расстояния до отражателя, который последовательно перемещался вдоль линии с шагом 0,1 мм в пределах 2 мм. По результатам исследований установлено, что разрешающая способность ME-5000 составляет 0,2 мм, что не превышает предыдущих оценок точности мекометра.

В районе этого же полигона ЦНИИГАиК были выполнены измерения и других линий дальностью 3-10 км (предельное расстояние по паспорту прибора – 8 км).

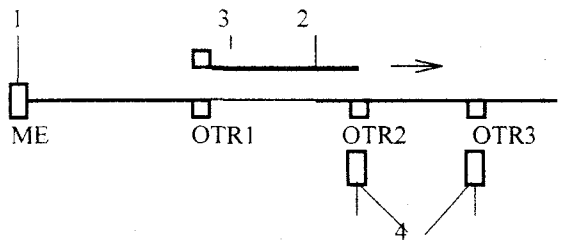


Рис.3. Схема проведения измерений на компараторе МИИГАиК
1 – место установки светодальномера ME-5000;
2 – эталонный жезл; 3 – место установки отражателя;
4 – отсчетные микроскопы

Средняя квадратическая погрешность, вычисленная по расхождениям в приеме из 12 измерений линии длиной около 10 км, составила $m = = \pm1{,}7\cdot10^{-7}D$ мм.

На компараторе в МИИГАиК проводилась оценка точности ME-5000 в диапазоне предельно коротких расстояний. Измерялись отрезки длиной 18,3; 21,3 и 24,3 м соответственно между мекометром, установленным на одном конце компаратора, и отражателем, зафиксированным на эталонном жезле, который перемещался по жестким направляющим компаратора (рис.3). При этом измерения длин линий выполнялись дважды при движении жезла в прямом и обратном направлениях. По разности результатов измерений длин смежных отрезков вычислялась длина жезла, результаты усреднялись и сопоставлялись с эталонной длиной. Истинная длина жезла

$$L = 3\cdot10^{6} - 76{,}3(5{,}386 -$$

$$- 0{,}0077t)t = 3000031{,}5 \text{ мкм},$$

где t – разность между температурой при испытаниях и стандартной температурой 20 °С.

Результаты вычислений приведены в табл.2. Из нее следует, что измеренная мекометром длина жезла меньше на

28 мкм, что соответствует погрешности измерений $m = \pm 1{,}7 \cdot 10^{-6} D$ мм. Большое в сравнении с результатами предыдущих исследований значение m объясняется тем, что измерение коротких линий выполнялось с точностью 0,1 мм, соответствующей наименьшему показанию младшего разряда на дисплее мекометра.

Таблица 2

Результаты измерений на компараторе МИИГАиК

Номер приема	Отсчет измерений	Длина жезла по измерениям ME-5000
Прямо	1	3,00003
	2	2,99997
Обратно	1	3,00012
	2	2,99988
Прямо	1	2,99993
	2	3,00012
Обратно	1	3,00002
	2	2,99996
	Среднее	3,000004

В ходе проведенных исследований было установлено, что изменения метеопараметров атмосферы в пределах цикла относительно слабо сказываются на точности измерений. Очевидно, это связано с улучшенными конструктивными особенностями приемопередатчика (высокая точность учета длины световой волны, минимизация дисперсии света и др.), а также с весьма малым временем единичного измерения расстояния – менее 1 мин, что существенно меньше преобладающих скоростей изменения параметров атмосферы в обычных условиях. Однако частота фиксирования показаний метеоприборов во время наблюдений должна определяться принятой программой наблюдений длин в каждом конкретном случае с учетом атмосферных условий вдоль трассы прохождения луча светодальномера.

Таким образом, результаты проведенных исследований ME-5000 подтвердили надежную работу прибора и возможность высокоточного измерения расстояний в диапазоне от 20 до 10000 м. На основании результатов исследований Центральным научно-исследовательским институтом геодезии, аэрофотосъемки и картографии (Москва) выдано свидетельство о точности ME-5000.

Пункты светодальномерного полигона в Саамском карьере закладывались на предохранительных бермах уступов в виде капитальных бетонных конструкций, жестко связанных с породами массива специально забетонированной арматурой и расположенных таким образом, чтобы наблюдать деформирование пород - подвижки по Саамскому разлому, который очень хорошо обнажен и прослеживается в бортах карьера. Конструкция реперов предусматривала принудительное центрирование прибора и отражателей с помощью цилиндрической втулки, которая одновременно входит в прецизионно обработанные отверстия репера и трегера прибора и отражателей. Горизонтирование прибора и отражателей производится двумя подъемными винтами, что обеспечивает их установку на одном и том же горизонте при всех измерениях.

К настоящему времени на полигоне Саамского карьера проведены три серии дальномерных наблюдений (пробная, базисная и дополнительная после сейсмособытия 27.10.1997 г.). Полученные данные позволяют утверждать, что применяемая методика и приборное обеспечение отвечают поставленным задачам и могут применяться для контроля за деформировани-

ем пород в условиях действующих горнорудных предприятий.

Полученный положительный опыт применения метода трилатерации позволил расширить программу наблюдений и разработать проект закладки трилатерационной сети для наблюдений за деформированием пород на участках, одновременно отрабатываемых открытым и подземным способами рудниками «Центральный» и «Расвумчорр» ОАО «Апатит».

С этой целью в качестве первого шага в 1998 г. был заложен светодальномерный полигон в 19-м буровом орте гор. +660 м Расвумчоррского рудника (рис.4).

Выбор места заложения полигона определялся результатами проведенного ранее математического моделирования изменения напряженно-деформированного состояния участка массива при его комбинированной отработке, указывающими на вероятное местоположение трещин отрыва и других опасных разрушений покрывающих пород именно в районе данного орта.

В конструкциях реперов подземного светодальномерного полигона были максимально использованы особенности реперов как подземных нивелирных полигонов, так и светодальномерного полигона на поверхности в Саамском карьере. В частности, установка реперов осуществлялась в шпурах за пределами ослабленной зоны, а само крепление отражателя к реперу обеспечивало принудительное центрирование. Для установки светодальномера была выполнена массивная железобетонная тумба со специальным центром, надежно и жестко связанным с массивом. Прутья арматуры тумбы забетонированы как в подошву выработки, так и в шпуры, пробуренные в ее стенке. Центрирование прибора также принудительное.

Произведенные пробный, базисный и рабочие циклы наблюдений доказали работоспособность светодальномера ME-5000 в подземных условиях при наличии в рудничной атмосфере водяной взвеси и тумана. Измерения производились тремя

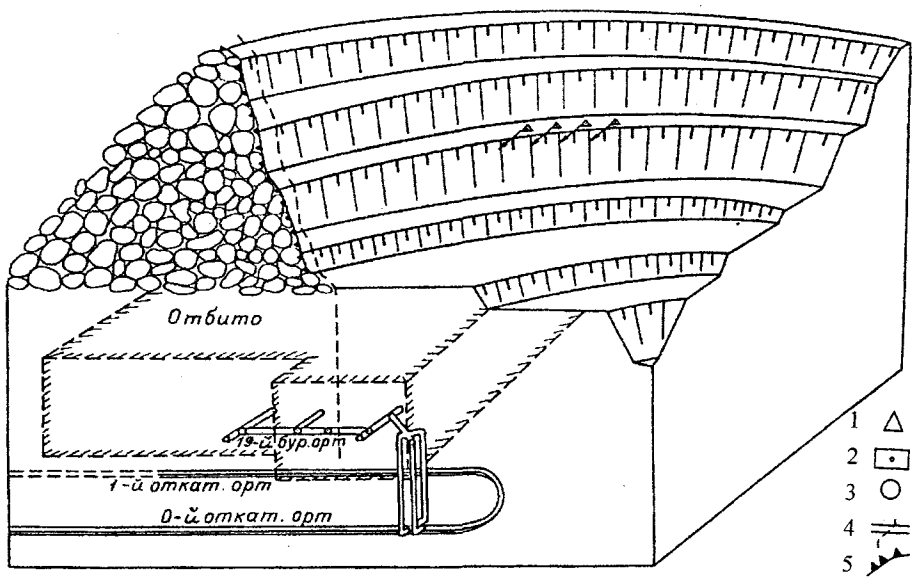


Рис.4. Схема проведения подземных светодальномерных измерений (Расвумчоррский рудник ОАО «Апатит»)
1 – контрольные реперы маркшейдерской службы рудника «Центральный» ОАО «Апатит» и направления смещения; 2 – место установки светодальномера; 3 – места установки отражателей; 4 – предполагаемое положение трещины отрыва; 5 – граница обрушения

ЭНТИ (ТУ)

Таблица 3

Длина стороны

Цикл	Дата	Сторона, м		
		I-3	I-2	I-1
Пробный	05.05.1998	30,6008	53,8991	92,8115
I	07.07.1998	30,6223	53,8987	92,8176
II	13.10.1998	30,6238	53,8998	92,8189
III	27.10.1998	30,6240	53,8999	92,8191

приемами на каждом пункте установки отражателя, по четыре отсчета в приеме. Для устранения вероятной ошибки горизонтирования между каждым отсчитыванием производилась новая установка отражателя. Необходимость такой методики продиктована тем, что в подземных условиях из-за неровностей стенки горной выработки отражатели приходится крепить призмой вниз, что создает известные неудобства при горизонтировании.

Метеорологический фактор – разница параметров атмосферы на пути следования луча лазера – учитывался считыванием данных психрометров на месте стояния прибора и установки отражателей каждые 2 мин с момента включения прибора до конца измерения. Данные этих измерений учитывались при камеральной обработке результатов в виде вносимых в измеренные длины поправок. Анализ данных измерений, приведенных в табл.3, свидетельствует о развитии деформаций в исследуемой части массива. Дальнейшие работы позволят оценить как геомеханические характеристики массива, так и устойчивость выработки.

Опыт организации светодальномерных наблюдений показал сравнительно небольшую трудоемкость работ по строительству полигона (бригада из двух человек при наличии пробуренных шпуров выполнила закладку полигона, состоящего из пяти реперов и пункта установки светодальномера, за две рабочие смены), а также сравнительно небольшую трудоемкость выполнения циклов наблюдений (бригада из трех человек выполняет наблюдения на полигоне за одну рабочую смену). Кроме того, подземные светодальномерные полигоны позволяют вести наблюдения независимо от погодных условий и сезона года, что дает возможность практически сколь угодно часто производить измерения в зависимости лишь от скорости контролируемого процесса.

Вполне очевидно, что полученные данные будут способствовать разработке и совершенствованию общей комплексной методики геомеханического мониторинга массива горных пород при воздействии природных и техногенных факторов.

Исследования выполняются при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – проект 97-05-64730.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Козырев А.А.* Опыт отработки блоков-целиков в удароопасных условиях / А.А.Козырев, В.А.Мальцев, В.В.Рыбин и др. // Горный журнал. 1996. № 9-10. С. 72-78.

2. *Козырев А.А.* Опыт профилактики горных ударов на Хибинских апатитовых рудниках / А.А.Козырев, В.А.Мальцев, В.И.Панин, В.В.Рыбин // Горный журнал. 1998. № 4. С. 47-51.

3. *Мельников Н.Н.* Геодинамический мониторинг при отработке месторождений Кольского полуострова / Н.Н.Мельников, А.А.Козырев, А.В.Ловчиков, С.П.Решетняк // Геоэкология. 1996. № 4. С.29-40.

4. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах. Апатиты, 1996. 321 с.

5. *Iliffe J.C.* Refraction effects on precise EDM observations / J.C.Iliffe, A.H.Dobson // Survey Review. October 1987. V.29. № 226. P.181-199.